

La tomographie appliquée à l'étude des techniques horlogères du XVIIe siècle : le cas du mécanisme de Simon Le Noir

Augustin GOMAND

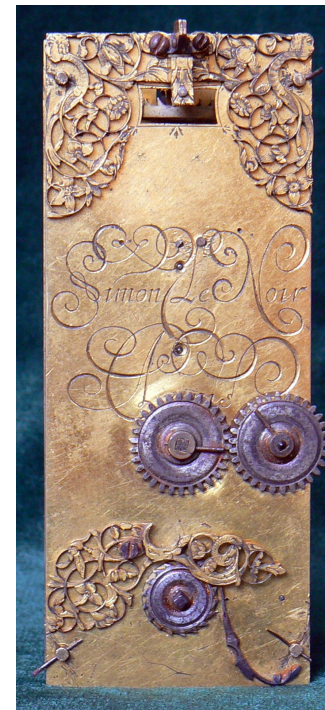
Rencontre régionale de l'AFAHA - 3 décembre 2023

Projet *Simon Le Noir*



Le projet Simon Le Noir

- Projet initié en octobre 2020 suite à 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
- 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
- Premiers articles publiés dans la revue *Horlogerie Ancienne* en 2022¹ et 2023²
- Site pour suivre l'avancement du projet : <https://agomand.github.io/asln/>
- Autres publications à suivre en 2024



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

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

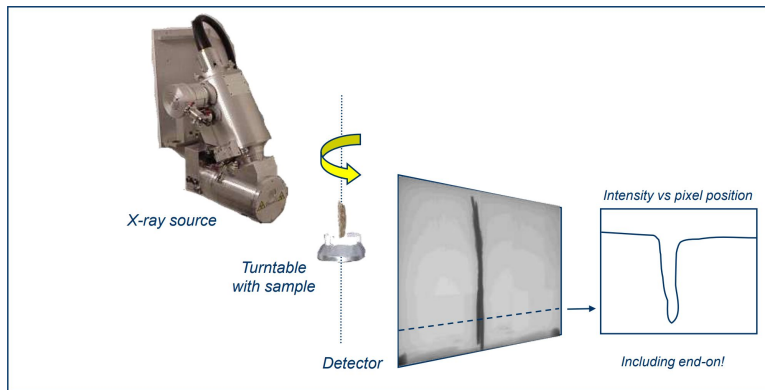
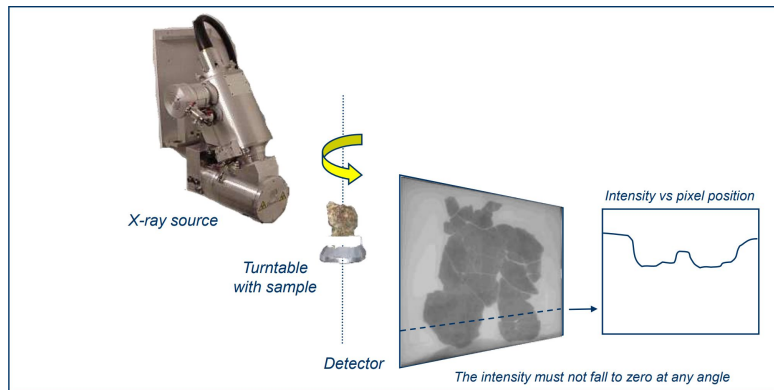
Statut actuel du projet

- Recherches sur Simon Le Noir et les premières horloges à pendule :
 - origine de l'anecdote identifiée → le manuscrit de Claude Raillard de ~1720
 - lien potentiel entre Le Noir et la Pologne : Tito Livio Burattini, un des premiers à avoir eu entre les mains une horloge de Coster dès 1657 + inventeur de plusieurs prototypes d'horloges
- Recherches sur l'histoire du mécanisme :
 - vente de la collection Leroux en 1896 → description de l'horloge complète
 - exposition de l'Union Centrale des Arts Décoratifs en 1880 → horloge exposée au Musée Rétrospectif, figure au catalogue de l'exposition
 - histoire récente du mécanisme : stockage dans un garage pendant plusieurs décennies ?
- Analyse poussée de l'authenticité du mécanisme par plusieurs approches :
 - stylistique : comparaison aux premières horloges à pendule / aux horloges de la Renaissance
 - métallurgique : analyse de la dorure, des aciers et des laitons qui composent le mécanisme
 - technique : toutes les parties du mécanisme ont-elles été fabriquées selon les techniques et standards du XVIIe siècle ?

→ ce dernier point reste à approfondir

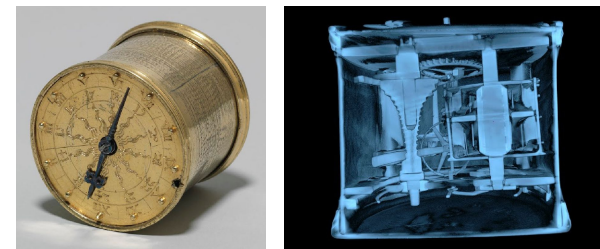
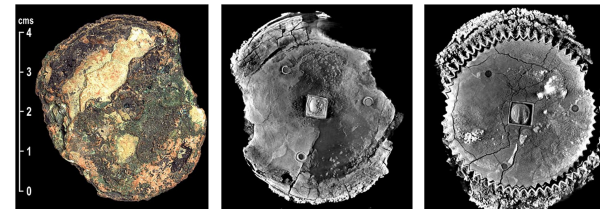
Méthode d'analyse : la tomographie

- Difficulté : beaucoup d'assemblages invisibles une fois la construction du mécanisme achevée
→ nécessité d'aller regarder à l'intérieur de la matière = **tomographie aux rayons X**
- Principe :
 1. On monte l'objet sur un support tournant
 2. On réalise des scans successifs de l'objet en le tournant légèrement entre 2 prises
 3. Les scans obtenus sont post-traités par ordinateur pour reconstituer l'objet en 3D



La tomographie et l'horlogerie

- Processus couramment utilisé dans les milieux industriels
- Nombreuses applications en archéologie (e.g. les analyses du mécanisme d'Anticythère, cf. images du haut ³)
- Technique très rarement appliquée à l'horlogerie :
 - scan du tambourin signé "Petrus Hele" en 2013 ⁴
 - 7 montres primitives scannées pour l'exposition consacrée à Peter Henlein en 2014
 - d'autres scans réalisés pour des collectionneurs privés (cf. images du bas ⁵)
- Utilisée pour analyser l'authenticité, étudier l'alignement des mobiles / les assemblages, examiner les réparations antérieures (bouchons...), etc.



³ [4] T. Freeth et al., A Model of the Cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism, Nature Scientific Reports, 11, mars 2021

⁴ [5] J. Ehrh, Ein Mythos auf dem Prüfstand - Die Untersuchungen an der sogenannten Peter Henlein-Uhr des Germanischen Nationalmuseum Nürnberg (Restaurierungsatelier Jürgen Ehrh, 2021) – photographies issues de <https://artsandculture.google.com/story/LAXxeqppGOtCLA>

⁵ [6] <https://www.renaissanceuhr.de/uhren/renaissanceuhren/burgunderuhr/>

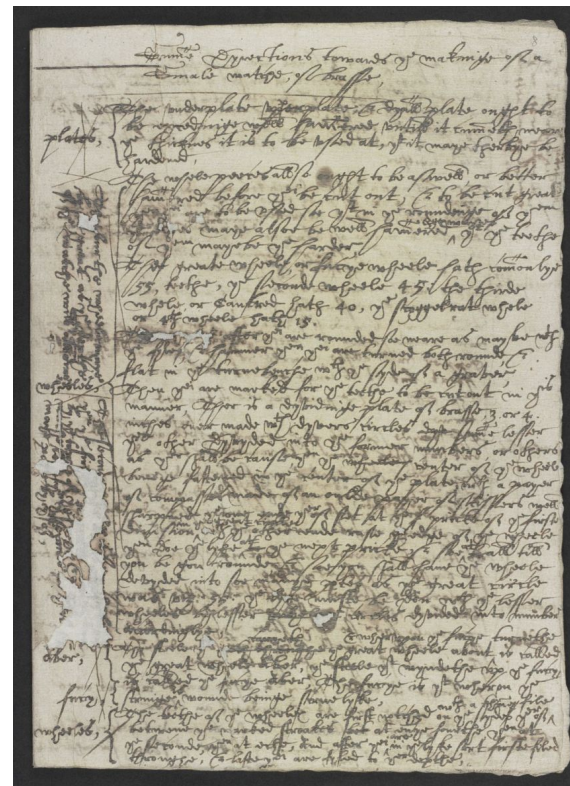
Ressources bibliographiques utilisées

- On a privilégié autant que possible des sources **primaires**, i.e. des documents du XVIIe et XVIIIe siècle : traités d'horlogerie, inventaires d'atelier, manuscrits...
- Ces documents sont malheureusement assez rares, et presque tous plus récents que le mécanisme (début / milieu du XVIIIe siècle)
- Un document en particulier a été essentiel : le manuscrit récemment découvert dans les papiers du savant John Evelyn⁶ dont la transcription a été publiée dernièrement dans *l'Antiquarian Horology*⁷

→ ce document inédit 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.

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

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



Introduction

La tomographie

► Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Tomographie au LMPS

- Premiers scans réalisés au LMPS de l'ENS Paris-Saclay (platines avant & arrière, roue de la fusée)



La platine arrière emballée avant son analyse



Le tomographe du LMPS (NSI X50)

Introduction

La tomographie

Bibliographie

► Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

Rivets

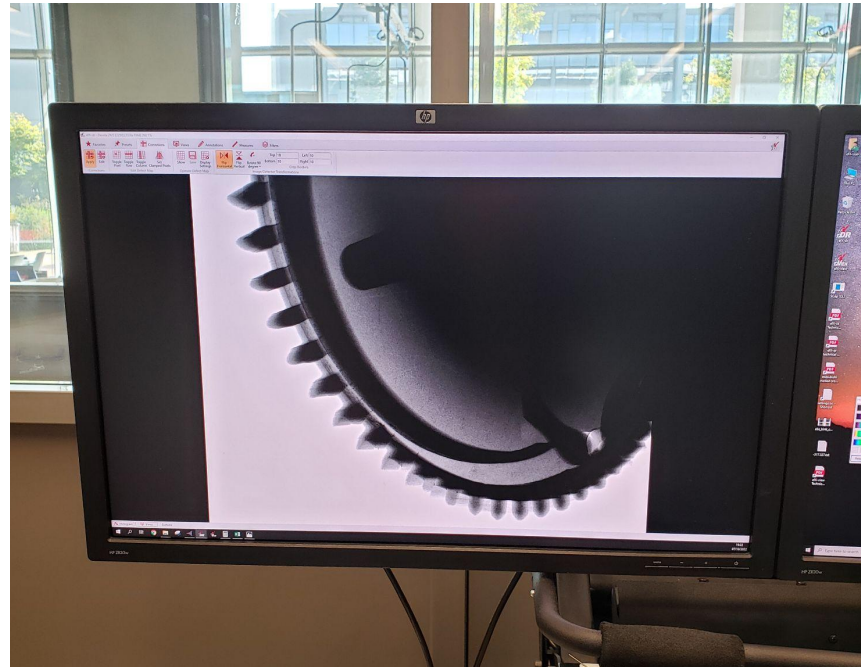
Perçages

Conclusion

Tomographie au LMPS



Analyse de la roue de la fusée



La roue de la fusée aux rayons X pendant son analyse

Introduction

La tomographie

Bibliographie

► **Analyses**

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

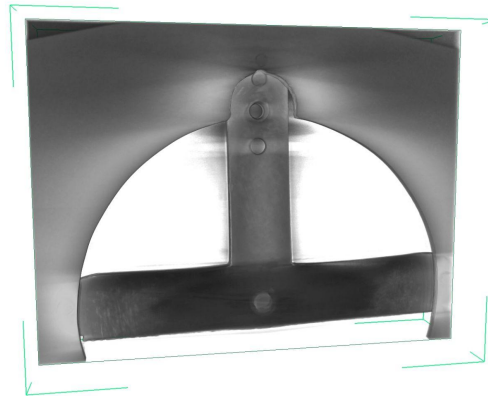
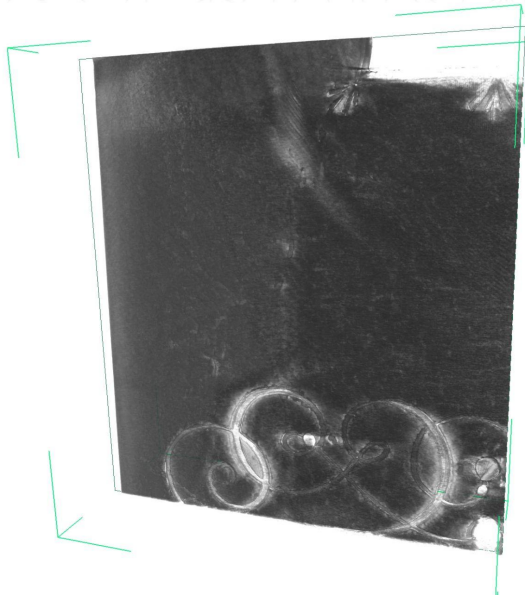
Rivets

Perçages

Conclusion

Tomographie au LMPS

- Reconstitution des différentes pièces, de gauche à droite : platine arrière, pont en T, roue de la fusée



Introduction

La tomographie

Bibliographie

► Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

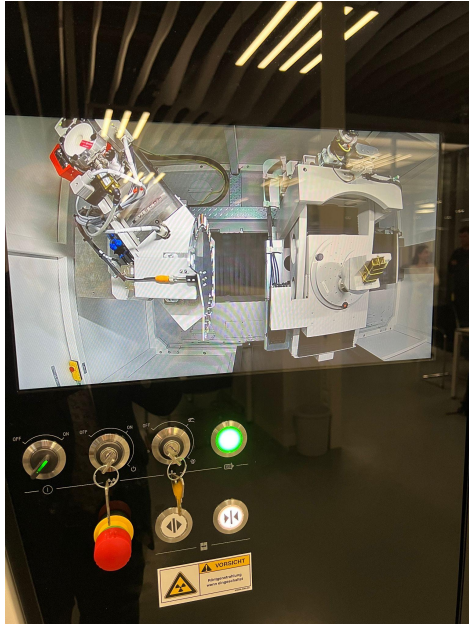
Rivets

Perçages

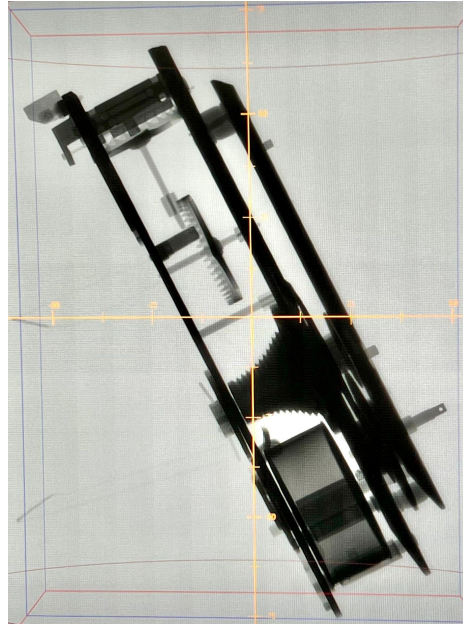
Conclusion

Tomographie chez Zeiss

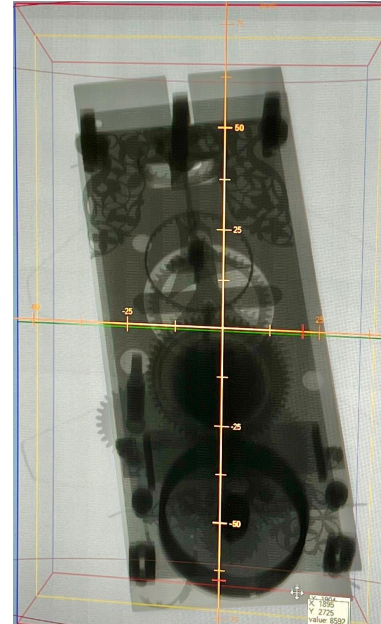
- Autres scans réalisés par Zeiss → le mécanisme a été scanné dans son intégralité



Le mécanisme dans le tomographe pendant son analyse



Deux vues du mécanisme aux rayons X



Introduction

La tomographie

Bibliographie

► Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

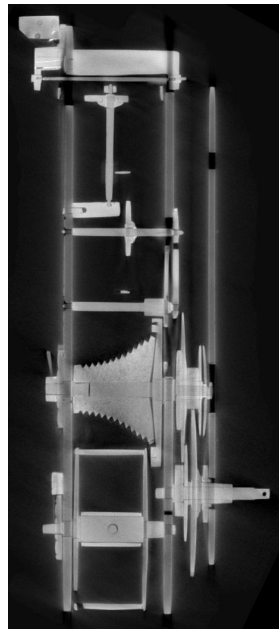
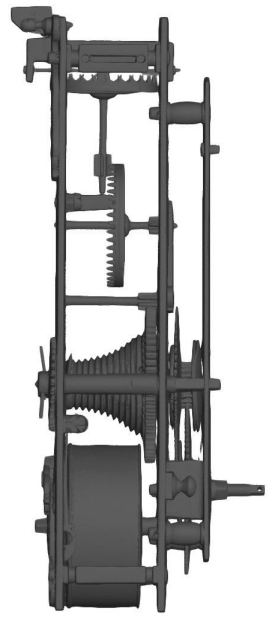
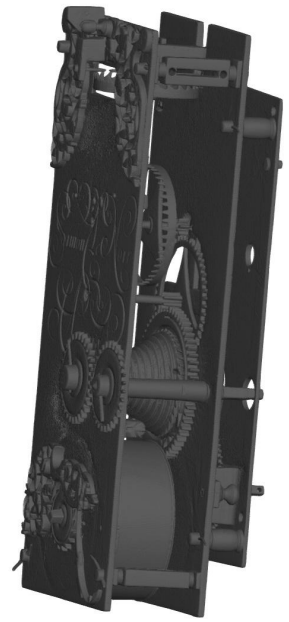
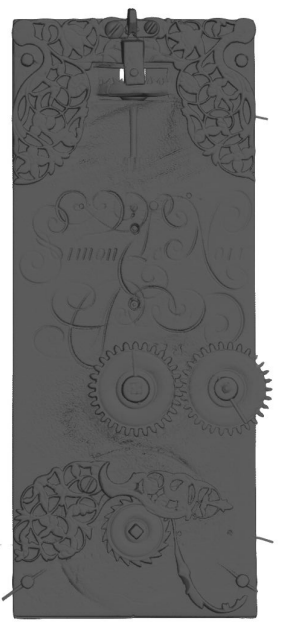
Rivets

Perçages

Conclusion

Tomographie chez Zeiss

- Reconstitution finale en 3D du mécanisme (vue en coupe à droite)



Introduction

La tomographie

Bibliographie

► Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

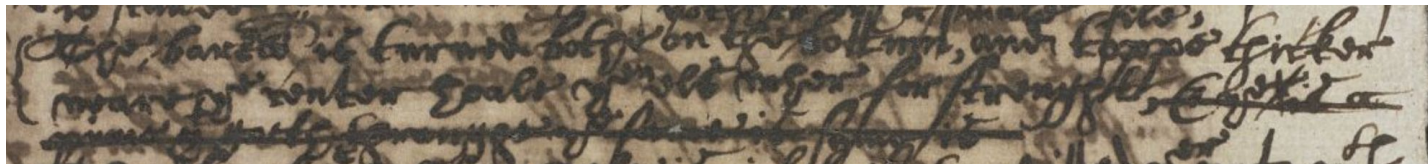
Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Épaisseur des plaques

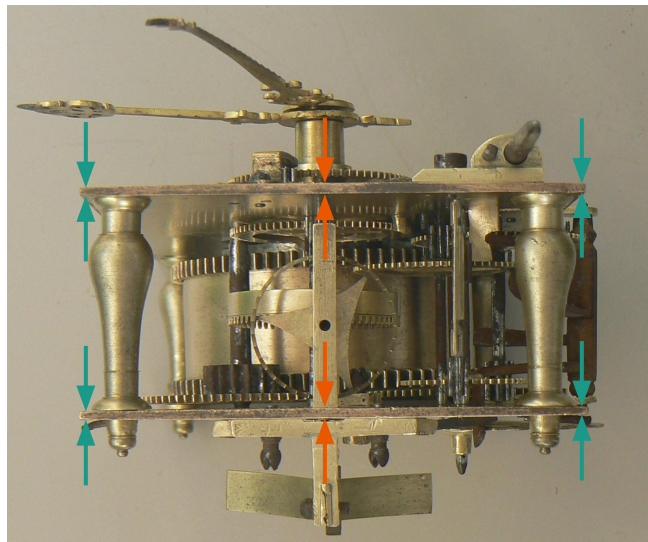
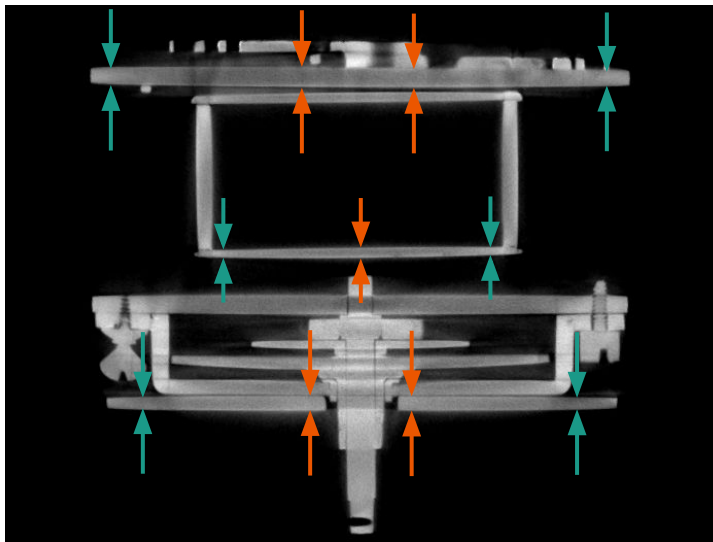


- barell,
The barell is turned bothe on the bottom, and toppe thicker
neare the center hoale then else wher for strength, ~~and ther is a
pinne that goeth throughe (same is same is)~~⁸
- *tambour*,
*Le tambour est tourné à la fois au fond, et en haut plus épais proche du trou central que
n'importe où ailleurs pour la résistance mécanique [...]*

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

Épaisseur des plaques

- On observe que presque toutes les pièces faites à partir de plaques (platines / roues / tambour...) sont plus épaisses au centre qu'à leurs extrémités
 - zones **les plus épaisses** = celles où il y a le plus de frottements / les forces les plus élevées
 - caractéristique qu'on retrouve sur les montres et horloges de la même époque (e.g. un mécanisme d'Isaac Thuret vers 1670-75 à droite)



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

► Plaques

Tambour

Fusée

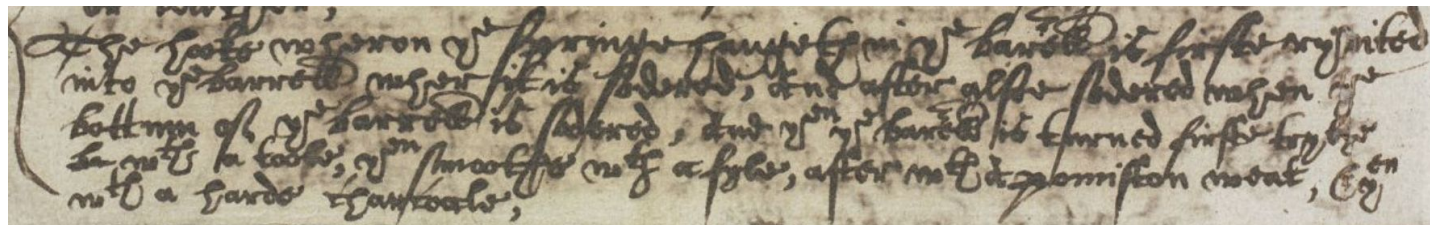
Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Fabrication et assemblage du tambour

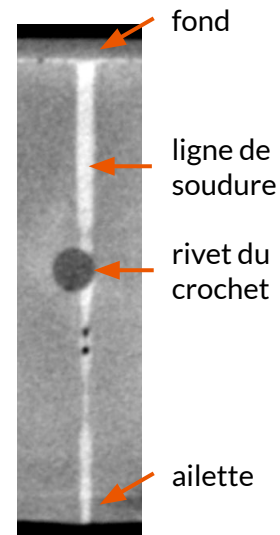
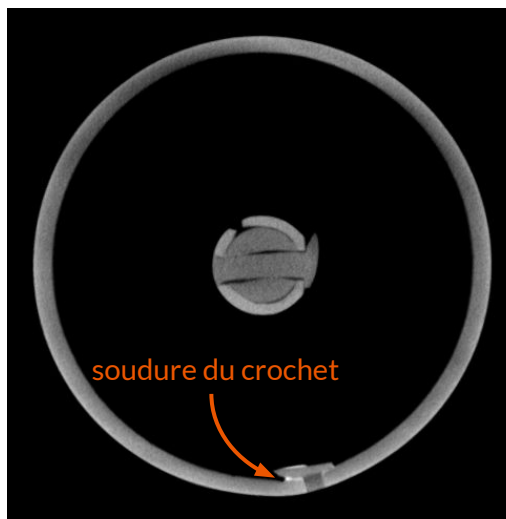
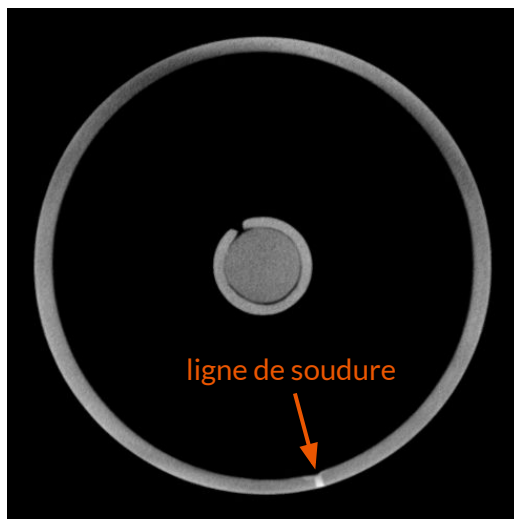


- The hooke wheron the springe hangeth in the barell is firste ryvited into the barrell wher it is sodered, and after also sodered when the bottum of the barrell is sodered, and then the barell is turned firste trylie ~~be~~ with a toole, then smoothe with a fyle, after with a pomiston weat, & then with a harde charcoale,⁹
- *Le crochet où le ressort est tenu dans le tambour est d'abord riveté à l'intérieur du tambour là où il est soudé, et après aussi soudé quand le fond du tambour est soudé, et ensuite le tambour est bien tourné [dressé] en premier lieu avec un outil, puis adouci avec une lime, puis avec une pierre ponce mouillée, & finalement avec un charbon dur*

⁹ [7] Papiers d'Evelyn, folio 9 verso

Fabrication et assemblage du tambour

- Rivet du crochet positionné à la **frontière de la ligne de soudure** de la paroi cylindrique
- Crochet **soudé** à l'intérieur de la paroi
- Détail intéressant : les ailettes qui maintiennent le couvercle sont **taillées dans la masse** lors du tournage de la paroi du tambour (cf. le prolongement de la ligne de soudure) → résistance mécanique ? D'autres pièces taillées dans la masse (e.g. le support de la roue d'entraînement), pratique commune à l'époque (e.g. les pignons lanternés des pascalines aussi taillés dans la masse)



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

▶ Tambour

Fusée

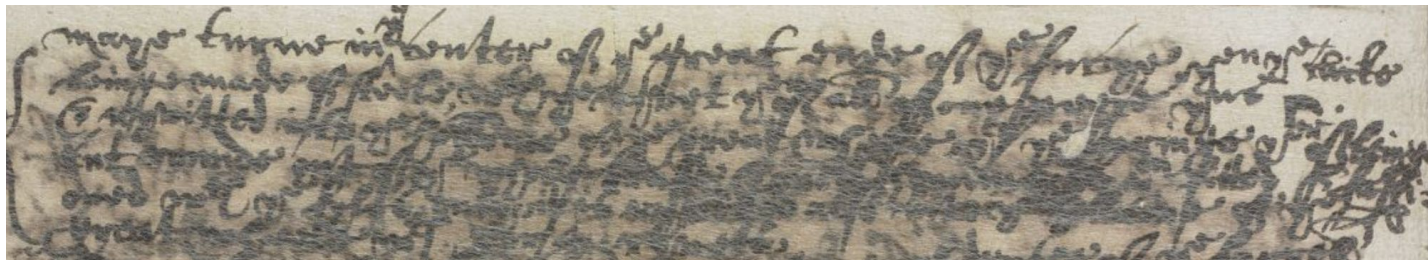
Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Roue de la fusée

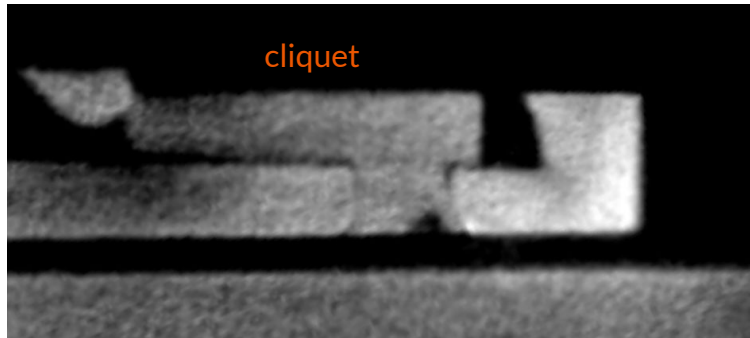


- maye tourne in the center of the great ende of the fuccye then the clicke being made of steel, with the ryvet therof all of one peece thus, & ryvitted into the hollowe of the great wheele, then the springs therof beinge cut round out of the whole brasse, & well hammered then fitted, & fashioned with the fyles only, it is ryvetted also into the hollowe of the great whele, with 3: or 4: ryvets,¹⁰
- *peut tourner au centre de la grande extrémité de la fusée puis le cliquet est fait d'acier, avec le rivet le tout en une seule pièce & riveté dans la cuvette de la grande roue, puis le ressort 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*

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

Roue de la fusée

- Le cliquet est bien façonné en une seule pièce et riveté dans la base de la fusée
- **Le ressort du cliquet est lui aussi riveté**, les rivets sont recouverts par la dorure mais visibles en coupe, disposés en cohérence avec l'épaulement de l'arbre de la fusée (cf. planches suivantes)
- Pas de soudure visible entre le ressort du cliquet et la roue

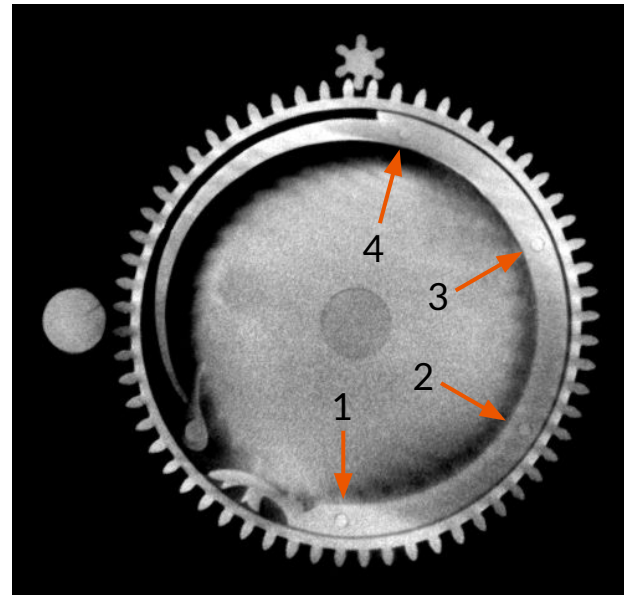
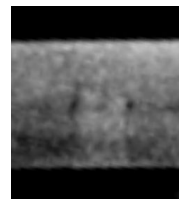
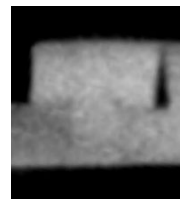
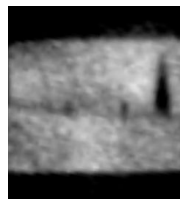
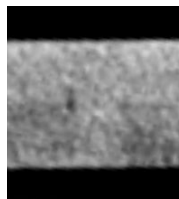


rivet 1

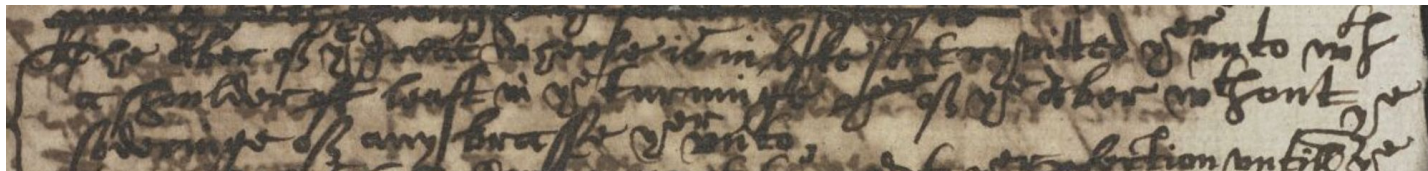
rivet 2

rivet 3

rivet 4



Arbre de la fusée



- The aber of the great whele is in lyke sort ryvitted therunto with a shoulder ~~of~~ least in the turning ~~ther~~ of the aber without the soldering of any brasse therunto,¹¹
- *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*

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

Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

► Fusée

Bouchons

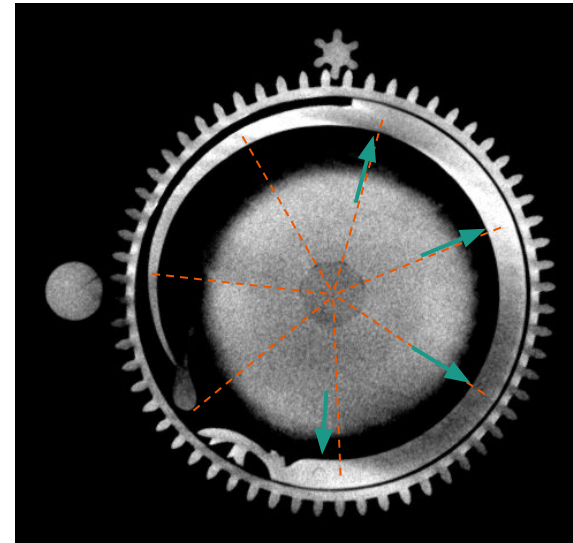
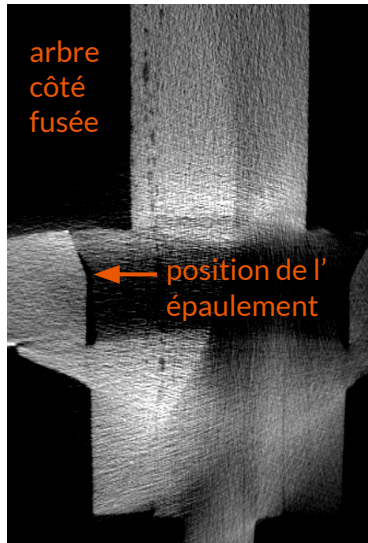
Rivets

Perçages

Conclusion

Arbre de la fusée

- L'arbre de la fusée a un **épaulement de forme heptagonale** qui se loge dans la roue à mi-hauteur
- L'épaulement se termine par une forme arrondie qui est celle qu'on voit de l'extérieur
- Les **arêtes de l'épaulement** sont dirigées vers les **4 rivets** du ressort du cliquet (identifiés par les flèches vertes), qui ont pu servir de repères
- Aucune soudure identifiée entre l'arbre et la roue



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

▶ Fusée

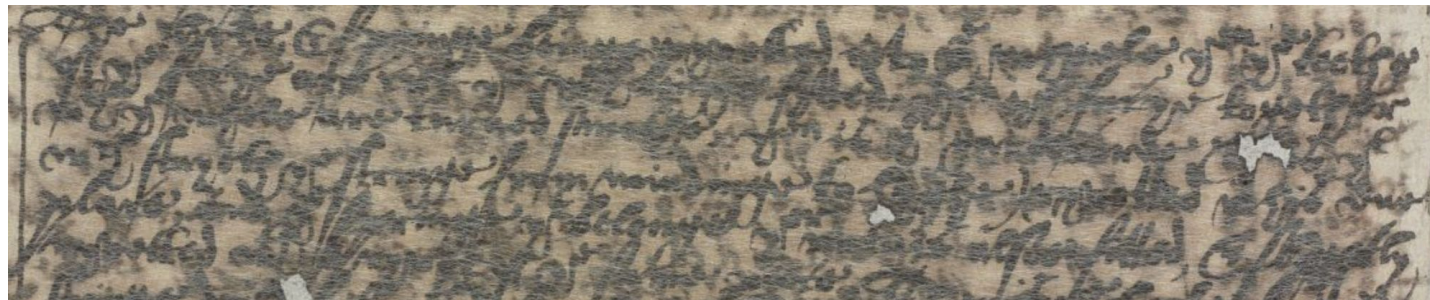
Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Garde-corde et crochet de la fusée

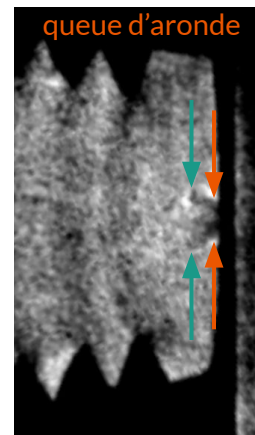
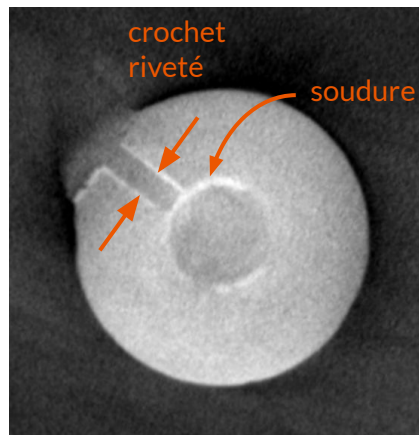
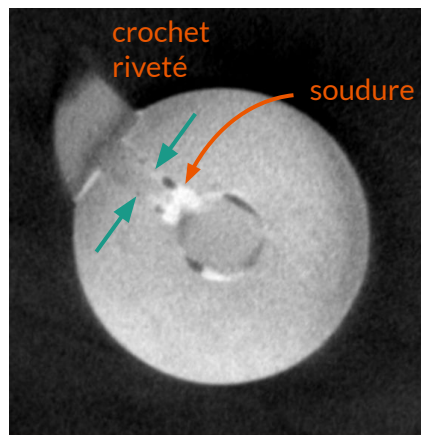
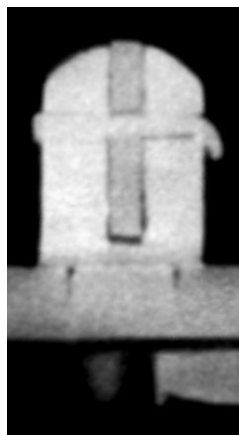


- The clicke and springe being ryvetted into the wheele, then the teethe of the fucye are cut the which beinge fytted, then the fucye together with the whele are turned smothe then is the gardecorde ([which] is that which stayeth the stringe from windinge to hyghe) ryvetted in his due place, And the springe that belongs therunto is alsoe fitted, & slyghtly ryvetted with a ryvet of the same peece,¹²
- *Une fois le cliquet et son ressort rivetés dans la grande roue, les dents de la fusée sont taillées comme il faut, puis la fusée en même temps que la roue sont tournées lisses puis **le garde-corde** (qui est ce qui empêche le ressort d'être remonté trop fort) **riveté** dans son emplacement dédié, Et **le ressort** qui lui est associé est aussi installé, & **riveté avec un rivet de la même pièce***

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

Garde-corde et crochet de la fusée

- La base du garde-corde est bien rivetée à la platine arrière (pas de soudure)
- Le ressort de la came d'arrêt est bien fabriqué en une seule pièce, incluant le rivet qui le fixe à la platine arrière
- Détail repéré sur les tomographies : le crochet de la fusée y est également riveté et soudé, dans un logement en **queue d'aronde**, sans doute pour l'empêcher de tourner dans son emplacement



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

► Fusée

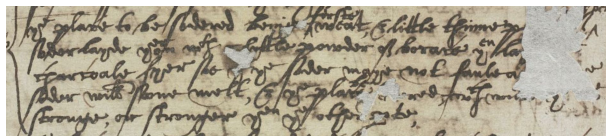
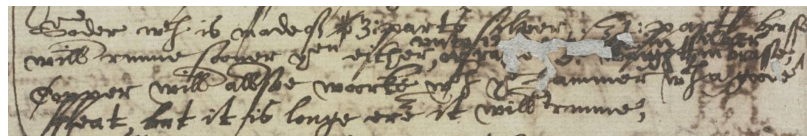
Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Soudure du carré de la fusée



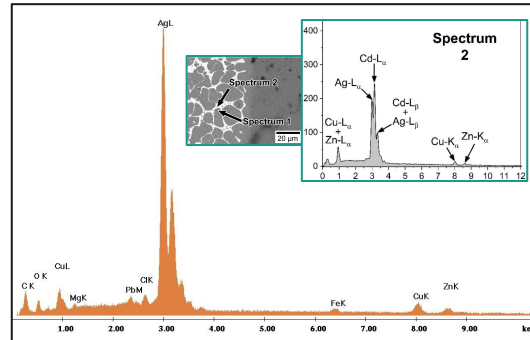
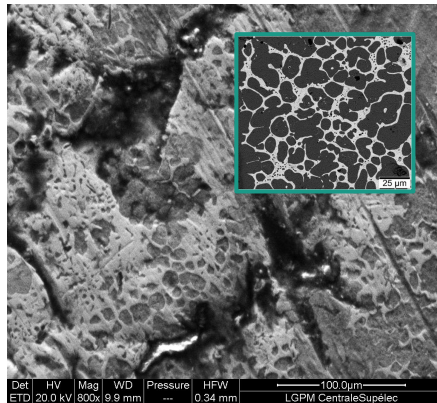
- Soder which is made of 2 3 parts silver & 1 parts brass [...] ¹³
- *La soudure faite de 2 3 parties d'argent & 1 partie de laiton [...]*
- the place to be sodered beinge firste weat, & little thinne p[ieces] of soder layde thereon with a lyttle powder of borace then lay { } charcoale fyer soe that the soder maye not faule a { } soder will soone melt, & the place be sodered which wilbe the { } stronge, or stronger then the other p[ar]te, ¹⁴
- *l'endroit à souder étant d'abord mouillé, & de petites paillettes de soudure déposées à cet endroit avec un peu de poudre de borax est ensuite laissé [sous] la flamme du charbon de sorte que la soudure ne puisse pas tomber [de la pièce.] la soudure va bientôt fondre, & l'endroit qui sera soudé sera le [plus] dur, ou plus dur que les autres parties*

¹³ [7] Papiers d'Evelyn, folio 8 verso (image de gauche)

¹⁴ [7] Papiers d'Evelyn, folio 8 verso (image de droite)

Soudure du carré de la fusée

- Analyse au MEB de la soudure de la fusée : présence majoritaire d'argent, laiton en petite quantité
- Zoom sur le dépôt de soudure : structure filandreuse, cohérente avec des analyses récentes menées sur une soudure argent-laiton-cadmium de composition similaire ¹⁵
- Du borax semble être détecté → cohérent avec la méthode décrite dans le manuscrit + on sait que les horlogers français du XVIIe siècle en utilisaient (cf. inventaire après décès de Loys Vautier ¹⁶)



EDX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

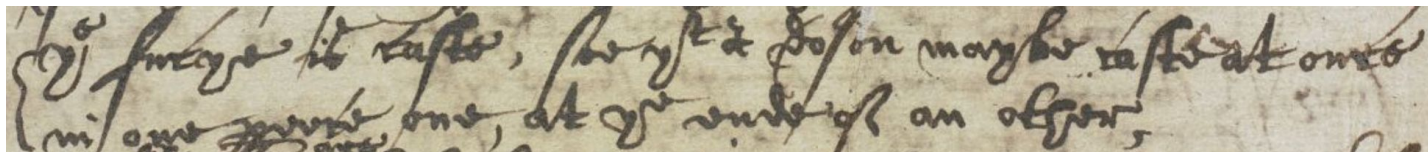
Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
B K	12.95	50.32	0.0513	1.1469	0.3456	1.0000
O K	4.93	12.94	0.0073	1.2051	0.1235	1.0002
NaK	1.43	2.62	0.0036	1.1262	0.2247	1.0013
AgL	70.47	27.44	0.6791	0.9353	1.0167	1.0000
CuK	6.15	4.07	0.0681	1.0173	0.9596	1.0000
ZnK	4.06	2.61	0.0402	1.0209	0.9692	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Backgrd	Inte. Error	P/B
B K	3.26	1.54	7.88	2.11
O K	10.22	2.29	3.83	4.46
NaK	7.16	5.59	6.09	1.28
AgL	378.23	11.08	0.54	34.13
CuK	18.83	5.74	2.98	3.28
ZnK	18.26	5.09	4.49	2.02

¹⁵ [9] T. F. de Abreu Santos et al., *Microstructural Evaluation of Copper Brazed Joints Using Silver-Based Filler Metal*, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 10, 2021, pp.174-183 (images issues de la page 179)

¹⁶ [10] E. Develle, *Les horlogers blésois au XVIe et au XVIIe siècle* (Rivière : Blois, 1917), p.52

Fabrication de la fusée



- fucye,
the fucye is caste, soe that a dos[e]n maybe caste at once
in one peece, one, at the ende {o}f an other,¹⁷
- *fusée*,
la fusée est coulée [=moulée], de sorte qu'une douzaine peut être coulée en une fois en une seule pièce, l'une, à l'extrémité d'une autre

¹⁷ [7] Papiers d'Evelyn, folio 8 verso

Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

▶ Fusée

Bouchons

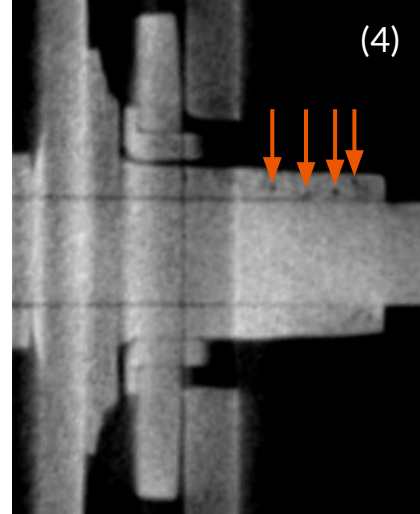
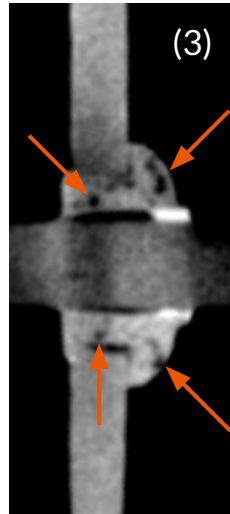
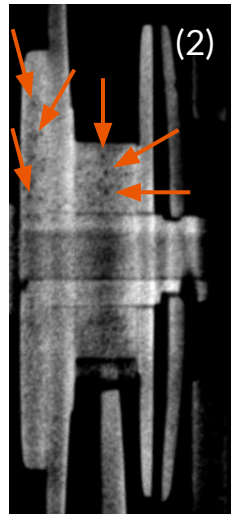
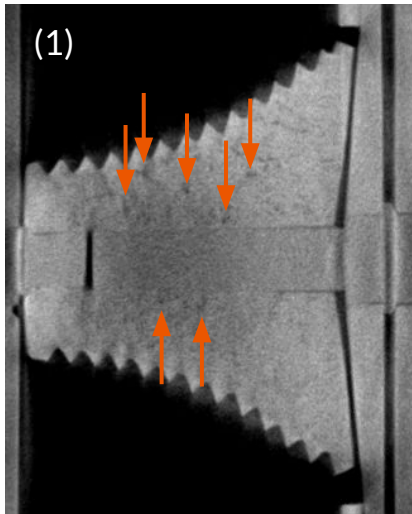
Rivets

Perçages

Conclusion

Fabrication de la fusée

- La fusée a bien été **coulée dans un moule sans martelage** : on observe des **bulles d'air** de forme ronde sur les vues en coupe, e.g. la vue de gauche (1)
- On retrouve des bulles similaires sur **un ensemble de pièce** : le pignon de la roue d'entraînement et le support de cette roue (2), l'assiette de la roue de champ (3), le canon de l'aiguille des heures (4)...
- Les analyses spectroscopiques montrent que **toutes ces pièces ont été coulées par la même personne** (même cuivre + même ratio des impuretés de nickel et d'étain)



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

▶ Fusée

Bouchons

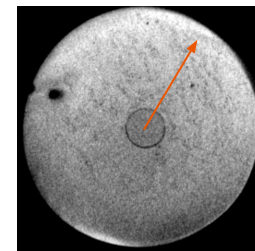
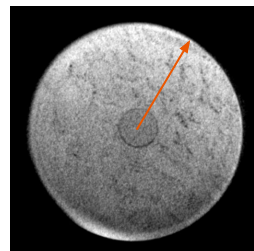
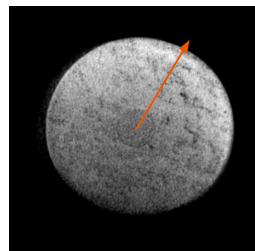
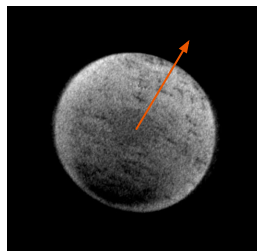
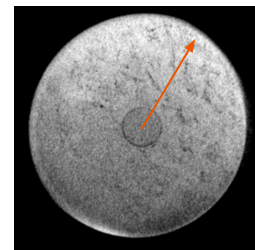
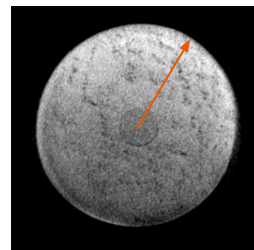
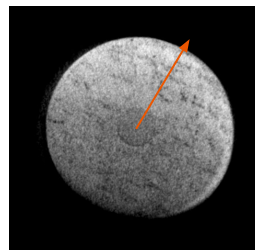
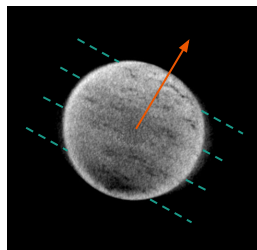
Rivets

Perçages

Conclusion

Fabrication de la fusée

- Les bulles sont relativement dispersées à l'intérieur de la fusée mais semblent plutôt regroupées dans une **direction privilégiée radiale** (et non pas selon la hauteur de la fusée) et **sous forme de "strates"**
→ le cône de coulée était possiblement éloigné des extrémités de la fusée¹⁸
→ coulage à l'**horizontal** comme suggéré par le manuscrit, une fusée à la suite d'une autre ?



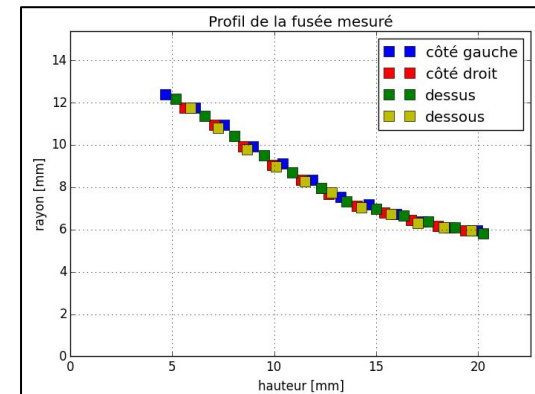
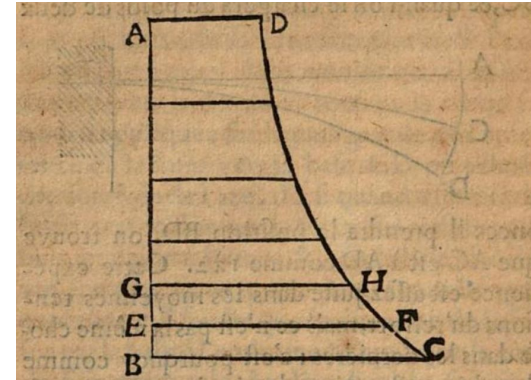
¹⁸ [11] M. Mödlinger, *Micro-X-ray computer tomography in archaeology: analyses of a Bronze Age sword*, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, janvier 2008, p.2

Profil de la fusée

- On a relevé le profil de la fusée sur les vues en coupe, en mesurant le rayon aux pics des “triangles” (figure du bas)
 - Philippe De la Hire avait calculé le profil théorique que doit suivre la fusée pour conserver le couple moteur, qui “ne doit pas être tout-à-fait conique comme l’expérience l’a fait connoître ; mais elle doit être un peu creuse vers le milieu” (cf. figure du haut)¹⁹
 - Hypothèses de De la Hire :
 - la force exercée par le ressort est proportionnelle au nombre de tours du barillet, ce qui est “assez juste dans les moyennes tensions du ressort”
 - on néglige “l’entortillement en spirale” = l’inclinaison du sillon en supposant que la corde “tourne en cercle”
 - l’espacement vertical des spires est constant (tacite)
- par un calcul différentiel, on peut montrer que le profil théorique s’exprime de la manière suivante :

$$r(z) = \frac{A}{\sqrt{z + z_0}}$$

¹⁹ [12] P. De la Hire, *Traité de mecanique [...]* (Paris : Imprimerie Royale, 1695), pp.231-237



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

▶ Fusée

Bouchons

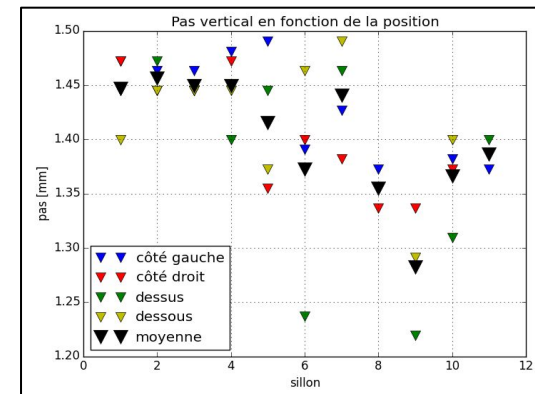
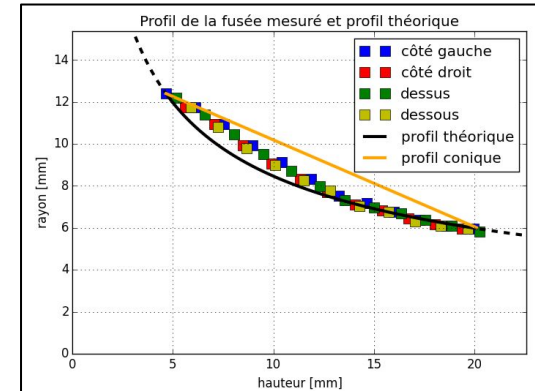
Rivets

Perçages

Conclusion

Profil de la fusée

- On peut calculer le profil théorique de la fusée sur la base de son diamètre mesuré aux 2 extrémités
 - en superposant le profil théorique au profil réel (figure du haut), on constate qu'ils se superposent bien sur la zone aux faibles rayons, et qu'ils s'écartent sensiblement aux grands rayons
 - **la fusée a été creusée vers le milieu**, comme le suggère De la Hire, en partant vraisemblablement d'un cône
- On constate également que le profil de la fusée présente un **point d'inflexion** (vers 8mm) et que le pas mesuré verticalement n'est **pas constant** (cf. figure du bas)
 - la fusée a nécessairement été **taillée à la main sans utilisation d'un outillage spécifique**, probablement selon la méthode décrite dans le manuscrit
- Avec le profil, on peut aussi calculer le nombre de tours :
 - de pré-armage du barillet : **~4.3 tours**
 - de remontage maximal du tambour : **~4.8 tours**
 - **en accord avec le standard de 4 tours de l'époque**²⁰



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

► Fusée

Bouchons

Rivets

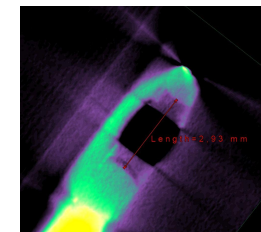
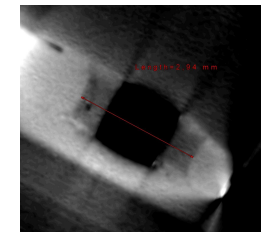
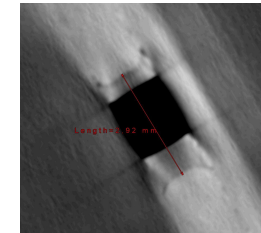
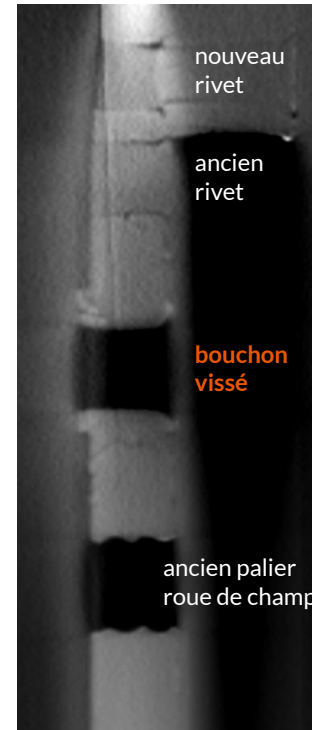
Perçages

Conclusion

²⁰ [8] Thompson, "Summe Dyrections", p.183 & p.186

Bouchons du pont en T

- Le diamètre interne du bouchon du pont en T a pu être mesuré avec précision et vaut environ **2.93mm** (cf. figures de droite), or on retrouve ce diamètre à 0.01mm près sur les trous des piliers (inter-platines et fausse platine) ainsi que sur l'arbre du pignon des minutes
 - très improbable que 2 horlogers aient utilisé un foret d'un diamètre identique au 1/100^e mm
 - **ce bouchon serait donc de Le Noir lui-même**
- On remarque aussi la présence d'un autre bouchon sur le palier de la roue de champ, **vissé** dans le pont en T
 - le pas de vis, triangulaire, mesure ~0.35mm, métrique ?
 - réparation d'assez mauvaise qualité réalisée après la dorure + la technique des bouchons vissés n'a été utilisée qu'à partir de la fin du XVIII^e siècle²¹
 - **probablement une réparation du XIX^e siècle**



²¹ [13] C. F. Vogel, *Practischer Unterricht von Taschenuhren* (Leipzig : verlegt Bernh. Christ. Breitkopf und Sohn, 1774), p.207

Diamètres internes des rivets

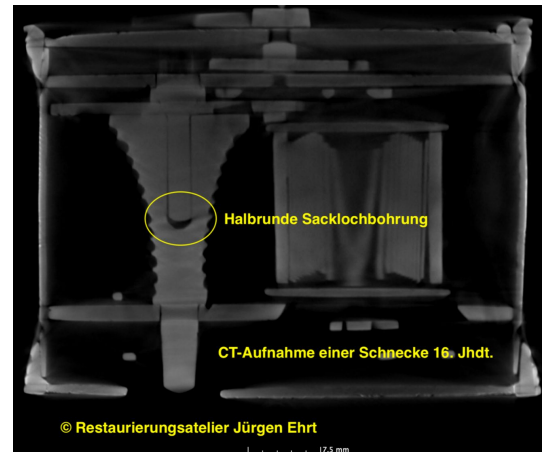
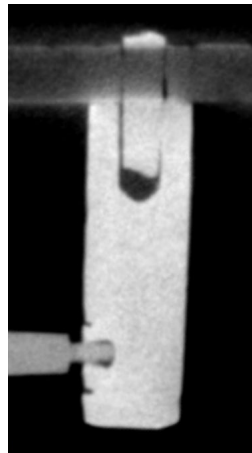
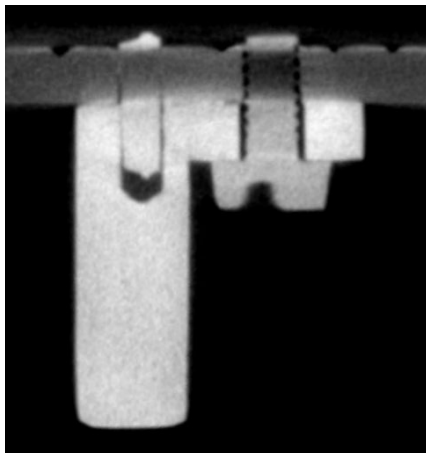
- La plupart des assemblages se font par rivetage (très peu de vis / goupilles)
- On peut mesurer avec précision le diamètre interne des rivets (et donc des perçages) sur les vues en coupe
 - permet une comparaison des pièces entre elles, sachant que les diamètres internes **ne peuvent pas être mesurés de l'extérieur** et n'ont donc pas pu être reproduits à l'identique sur des pièces apocryphes
- Le tableau à droite montre la répartition des diamètres mesurés, ainsi que ceux de quelques trous d'origine de diamètres similaires à titre indicatif
 - **on peut regrouper ces diamètres en 5 groupes qui se retrouvent d'une pièce à l'autre de manière "croisée"**
 - pas de valeur "métrique" comme attendu
 - **conforte l'authenticité globale**

Pièce	Positions et nombre	Diamètre (mm)
Platine avant	Rivets pont en T (3)	1.06 +/- 0.01 (1) 1.39 +/- 0.04 (2)
	Trou inutilisé (1)	1.29 +/- 0.02
Platine arrière	Cheville potence (1)	1.42 +/- 0.01
	Trous inutilisés (2)	0.88 +/- 0.01
Pont en T	Rivets (4)	1.12 +/- 0.01 (1) 1.30 +/- 0.01 (3)
	Ancien palier (1)	1.42 +/- 0.01
Pont de la verge	Cheilles platine (2)	1.41 +/- 0.01
Pont de la minuterie	Fixations pattes (2)	1.51 +/- 0.10
Portes-suspension	Fixations pattes (2)	1.47 +/- 0.14
	Assemblage (2)	1.12 +/- 0.02 (1) 1.06 +/- 0.02 (1)
Roue des minutes	Rivets disque (3)	0.85 +/- 0.03
Roue de la fusée	Rivets ressort (4)	1.06 +/- 0.02

N.B. : les diamètres de ~1.4mm & ~1.5mm sont très proches du pas de la fusée, autour de 1.45mm

Perçage de la potence inférieure

- Les perçages étaient réalisés à l'époque avec des forets de type "langue d'aspic"
 - ces forets étaient moins durs que ceux actuels et devaient être affutés régulièrement
 - dans la potence inférieure de la roue de rencontre, l'extrémité du trou est légèrement arrondie et dissymétrique, et son angle ne correspond à aucune norme moderne (autour de 100-110°)
 - similaire au perçage d'un diamètre comparable dans la fusée d'une montre tambourin du XVIe siècle²² (image de droite)



²² [14] J. Ehrth, *Untersuchung und Auswertung einer sich als „HorizontalTischuhr aus dem 16. Jahrhundert“, ausgehenden Uhr mit astronomischer Anzeige*, 2022, p.20

Perçages des paliers de la verge

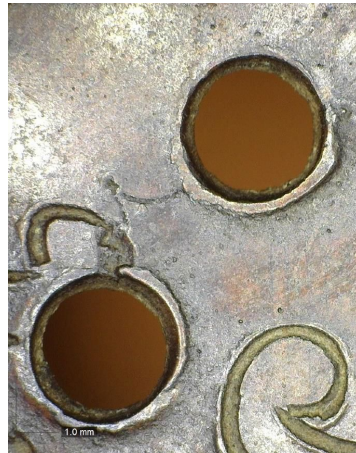
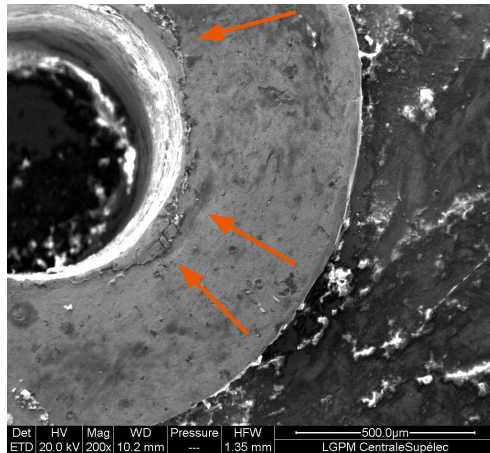


- the Cocke is that wherin the upper pyvet of the ballance Turneth, It is made of a thicke peece of brasse, hammered thinne at the ends, & bothe the upper notche, & under notche strooke on the side of an anvile in the hammeringe, The hoale in the middell beinge first drilde, then strooke, with a (squayre) Poonche, [...] ²³
- *Le coq est [la pièce] dans laquelle tourne le pivot supérieur du balancier, il est fait d'un morceau de laiton épais, affiné par martelage à ses extrémités, & sa pointe supérieure, ainsi que celle inférieure, sont aplanies sur le côté d'une enclume pendant le martelage, Le trou au milieu est d'abord percé, puis aplani, avec un pointeau (carré), [...]*

²³ [7] Papiers d'Evelyn, folio 11 recto

Perçages des paliers de la verge

- Le bourrelet de laiton créé par le perçage a été **écrasé** pour obtenir une surface lisse
→ ce n'est pas la verge qui a aplani le bourrelet car son épaulement n'arrive pas au contact du palier (les pivots sont limités dans leur déplacement axial par les tiges de bronze chassées dans les paliers)
→ usage probable d'un pointeau pour "araser" la surface comme décrit dans le manuscrit, on observe des traces d'écrasement similaires sur les trous poinçonnés de la "sphère de Genève" (globe mécanique japonais du XVIIe siècle, images du centre et de droite ²⁴)



Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

Rivets

▶ Perçages

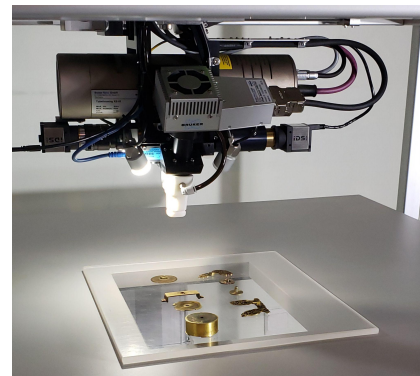
Conclusion

²⁴ [15] M. Martín-Torres, *Metallurgical analysis of the Geneva sphere*, 2017

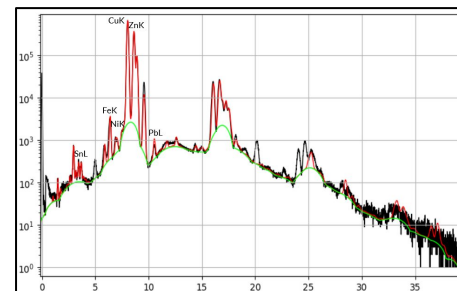
Conclusion et perspectives

- Très bon accord avec les techniques de fabrication décrites dans le manuscrit d'Evelyn et d'autres documents d'époque
- Confirmation de l'authenticité de certaines parties "suspectes" (bouchons...), réparations identifiées
- Nouvelles informations sur la fabrication des horloges au milieu du XVIIe siècle
- **Premiers scans d'une horloge historique disponibles en open-source**
- Suite des analyses : spectroscopie XRF pour identifier les éléments traces des laitons et se comparer à d'autres horloges du XVIIe siècle (Thuret / Coster / ...)

Je remercie vivement Benjamin Smaniotto (LMPS), Tobias Gabriel (Zeiss) et Patrick Rocca (Arithmeum) pour avoir rendu possible la réalisation des scans



Analyses XRF des pièces par le CRC



Spectre XRF du couvercle du tambour

Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

Rivets

Perçages

► **Conclusion**

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/asIn/documents.html>
2. A. Gomand, *Compléments dans l'affaire Simon Le Noir*, Horlogerie Ancienne, 93, juin 2023, en ligne : <https://agomand.github.io/asIn/documents.html>
3. A. Ramsey, *X-ray Tomography of the Antikythera Mechanism* (Kerastari, 13 juin 2012), en ligne : https://www.atnf.csiro.au/people/atzioumi/Antikythera2012/presentations/X-ray_Tomography-Ramsey.pdf
4. T. Freeth *et al.*, *A Model of the Cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism*, Nature Scientific Reports, 11, mars 2021, en ligne : <https://www.nature.com/articles/s41598-021-84310-w>
5. 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>

Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Bibliographie

6. <https://www.renaissanceuhr.de/uhren/renaissanceuhren/burgunderuhr/>
7. British Library : Add. MS 78425 – Papiers d’Evelyn (*Evelyn Papers*). Vol. CCLVIII, fol. 8 recto - 14 recto, en ligne :
https://access.bl.uk/item/viewer/ark:/81055/vdc_100110232103.0x000001
8. D. Thompson, ‘*Summe Dyrections towards the makinge of a smale watch, of brasse*’ – A guide to watchmaking techniques in the seventeenth century, *Antiquarian Horology*, 44-2, juin 2023
9. T. F. de Abreu Santos *et al.*, *Microstructural Evaluation of Copper Brazed Joints Using Silver-Based Filler Metal*, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 10, 2021, en ligne :
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13632-021-00722-0>
10. E. Develle, *Les horlogers blésois au XVIe et au XVIIe siècle* (Rivière : Blois, 1917)
11. M. Mödlinger, *Micro-X-ray computer tomography in archaeology: analyses of a Bronze Age sword*, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, janvier 2008, en ligne
12. P. De la Hire, *Traité de mecanique [...] (Paris : Imprimerie Royale, 1695)*, en ligne :
https://www.google.fr/books/edition/Trait%C3%A9_de_mecanique_ou_l_on_explique_to/iRKUyJN7vA4C?hl=fr&gbpv=0

Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion

Bibliographie

13. C. F. Vogel, *Practischer Unterricht von Taschenuhren* (Leipzig : verlegts Bernh. Christ. Breitkopf und Sohn, 1774), en ligne : <https://www.digitale-sammlungen.de/de/view/bsb10305943>
14. J. Ehrt, *Untersuchung und Auswertung einer sich als „HorizontalTischuhr aus dem 16. Jahrhundert“, ausgebenden Uhr mit astronomischer Anzeige*, 2022, en ligne : <https://www.uhrenrestaurator.de/de/pdf-download-ein-mythos-auf-dem-pruefstand?task=weblink.go&id=6>
15. M. Martínón-Torres, *Metallurgical analysis of the Geneva sphere*, 2017

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

Introduction

La tomographie

Bibliographie

Analyses

Plaques

Tambour

Fusée

Bouchons

Rivets

Perçages

Conclusion