

# Rétroconception et maquettage d'un bâtiment mécanique de la Rome antique

Matthieu Quantin

LS2N – École Centrale de Nantes  
1 rue de la Noë - Nantes - France  
[matthieu.quantin@ec-nantes.fr](mailto:matthieu.quantin@ec-nantes.fr)

Nathalie André,  
IRAA, CNRS-AMU

7 rue Raulin – Lyon –France  
[nathalie.andre@msh.univ-aix.fr](mailto:nathalie.andre@msh.univ-aix.fr)

Florent Laroche

LS2N – École Centrale de Nantes  
1 rue de la Noë - Nantes - France  
[florent.laroche@ec-nantes.fr](mailto:florent.laroche@ec-nantes.fr)

Françoise Villedieu,  
CCJ, UMR 7299-AMU

5 rue du Château de l'Horloge - Aix-en-Provence – France  
[francoise.villedieu@gmail.com](mailto:francoise.villedieu@gmail.com)

**Résumé**—Cet article témoigne du projet de rétroconception et de fabrication à l'échelle 1:80 d'un objet mécanique ancien exceptionnel: la salle à manger tournante de Néron. Ce travail engage archéologues, ingénieurs (étudiant et chercheur), muséographe et conservateur de musée. La maquette mécanique est exposée à Marseille. La conception repose sur un système d'hypothèses archéologiques (fortes incertitudes), modulaire pour intégrer l'évolution des connaissances à son cycle de vie ; la conception et le processus de fabrication ont dû tenir des délais très courts, avec une mécanique non standard (romaine antique).

**Mots-clés**—rétroconception, fabrication additive, interdisciplinarité

## I. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, la 3D a intégrée l'ensemble des activités intellectuelles et physiques de notre vie quotidienne tant personnelle que professionnelle.

Le milieu muséographique n'a pas échappé à cette tendance. Il est partagé entre deux points de vue : d'un côté une capitalisation historique à des fins de compréhension scientifique de notre patrimoine, de l'autre une vulgarisation à destination du grand public.

Notre équipe de recherche travaille depuis plus de 10 ans dans ce domaine interdisciplinaire.

### A. L'objet et le projet

Il s'agit d'un bâtiment cylindrique d'une trentaine de mètres de haut pour 25m de diamètre, qui aurait été construit et utilisé entre l'an 54 et 68, par Néron empereur romain, sur le mont Palatin (Rome). Sous la coupole, ce bâtiment aurait accueilli un plateau entraîné en rotation lente, il s'agirait du premier restaurant panoramique tournant de l'histoire (Figure 1).

Plusieurs campagnes de fouilles archéologiques (2009, 2011, 2014) mettent en évidence une zone dédiée à un mécanisme[1]. Des restitutions numériques présentent les premières hypothèses<sup>1</sup>. Les connaissances de l'objet sont

nécessairement incertaines: la fouille est limitée par des zones dites "réserves de fouilles", tandis que certains éléments ont disparus.

Bénéficiant du partenariat de la surintendance de Rome et de l'École française de Rome, organisme responsable des fouilles archéologiques sur le Palatin ; pour l'exposition « *Le banquet, de Marseille à Rome, Plaisirs et jeux de pouvoir* » (Musée d'Archéologie de Marseille du 2 décembre 2016 au 21 juin 2017) le choix d'une maquette se justifie par 3 objectifs :

- *Heuristique*, pour la recherche. La maquette physique est une base commune de réflexion pour tous les métiers de l'archéologie à l'ingénieur.
- *Muséologique*, pour le musée. L'exposition vise à montrer des objets, or la fouille n'a pas découvert de mobilier mais un bâtiment.
- *Pédagogique*, pour la valorisation. La maquette physique en mouvement démontre plus explicitement le fonctionnement du bâtiment qu'une représentation numérique.

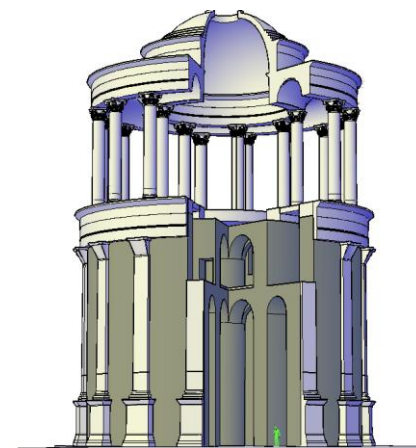


Figure 1 . Reconstitution du bâtiment (coupe sans mécanisme)

<sup>1</sup> Voir le reportage du journal du CNRS en 2011 : [lejournald.cnrs.fr/videos/incroyable-salle-a-manger-tournante-de-neron](http://lejournald.cnrs.fr/videos/incroyable-salle-a-manger-tournante-de-neron)

Le dispositif muséographique final positionne la maquette à hauteur d'homme afin de permettre au visiteur de « lire » le mécanisme. Un panorama issu d'une photo semi-circulaire du Palatin assure le décor arrière ; il simule ainsi le regard que Néron posait sur sa ville lors de ses banquets.

### B. La 3D et le patrimoine

Les cas de retro-conception d'objets anciens sont nombreux. La composante 3D de la plupart des projets s'arrête à l'acquisition (scan). Cette base permet de mesurer a posteriori sur le nuage de points acquis. Certains confrontent une restitution (modélisation) hypothétique à l'acquisition. [2]. Cette restitution peut concerner des éléments disparus [3], des corrections[4], ou un mécanisme qui ne fonctionne plus[5], et parfois une combinaison des deux [6].

Côté rétro-fabrication, certains projets se focalisent sur les modèles d'acquisition 3D [7], parfois pour les restitutions hypothétiques de bâtiment [8] ou de mécanisme[9].

Dans notre cas, il s'agit d'une combinaison de plusieurs de ces cas: bâtiment avec acquisition et restitution, et mécanisme en fonctionnement. Il s'agit d'une réalisation d'un grand volume : 530mm de haut et 350mm de diamètre par fabrication additive. Ce projet est réalisé dans un temps restreint et à moindre coût et intègre un projet étudiant.

## II. LA CONCEPTION

Cette phase engage archéologue, architecte, ingénieurs (étudiant et chercheur), muséographe et conservateur de musée. Le dessin du bâtiment revient à archéologues, la conception du mécanisme aux ingénieurs.

### A. Le bâtiment

Un relevé photogrammétrique sert de base pour la modélisation volumique (manuelle et hypothétique) du bâtiment. L'acquisition 3D du site, dans un contexte fragmentaire urbain, permet de mettre en correspondance des espaces non-contigus lors des fouilles, puisqu'il s'agit de « puits » juxtaposés[10] ; mais aussi de mesurer systématiquement les écarts du modèle au réel et l'ampleur des zones inconnues (Figure 2).

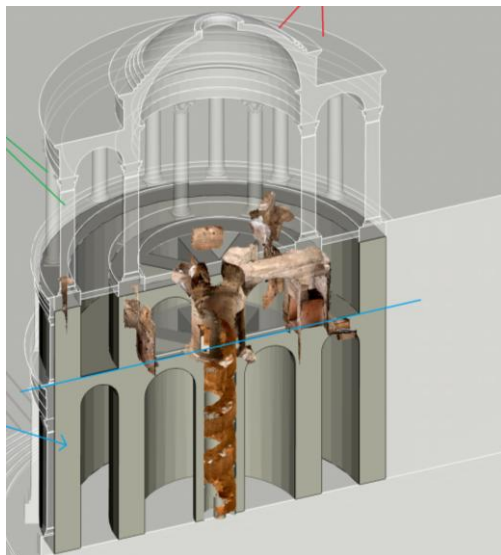


Figure 2 : Zones relevées et restitution. Image de Nathalie André.

Nous hiérarchisons les certitudes des connaissances archéologiques [11] selon 4 niveaux, associé à 4 couleurs sur la maquette (Figure 3).

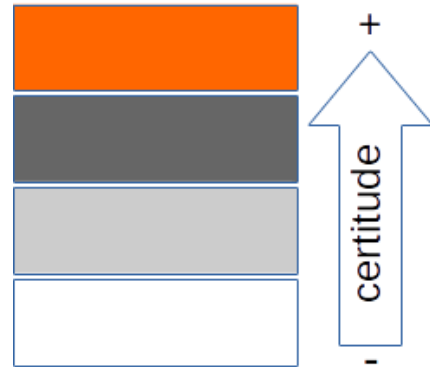


Figure 3 Une couleur pour chaque niveau de certitude archéologique

Le bâtiment modélisé est modulaire pour intégrer l'évolution des hypothèses archéologiques à son cycle de vie. En effet après 3 campagnes de fouilles, un prochain chantier est programmé pour l'été 2017. La connaissance du bâtiment sera donc amenée à évoluer, de nouvelles données et connaissances peuvent affecter le système d'hypothèses lié au mécanisme.

La maquette du bâtiment se découpe en 3 secteurs angulaires, chacun peut être mis à jour indépendamment de l'ensemble. Un quart du bâtiment n'est pas représenté sur la maquette afin de laisser l'espace pour différentes versions du mécanisme. L'absence de ce quart de bâtiment permet aussi au visiteur d'observer l'intérieur du bâtiment en coupe (Figure 4).



Figure 4 : La maquette du bâtiment

Le mécanisme d'origine a entièrement été pillé (parties métalliques), et seules quelques traces subsistent. La plupart de ces traces sont des empreintes de barres métalliques dans la maçonnerie (voir exemple en Figure 5). Un travail interdisciplinaire d'interprétation permet de combiner les connaissances archéologiques et historiques aux connaissances en mécanique et matériaux. Ces indications dans la maçonnerie fouillée constituent le cahier des charges de la rétro-conception du mécanisme. La maquette ne restitue pas ces détails, trop fins pour cette technologie à cette échelle (Figure 5).



Figure 5: Trace du mécanisme (20cm)

### B. La mécanique

Les romains disposaient d'un réseau hydraulique développé. L'entraînement du mécanisme est probablement réalisé grâce à une dérivation (l'*ArcusNeroniani*) de l'aqueduc proche<sup>2</sup>. Cette dérivation (Figure 6) à l'usage du palais, amène entre 384 et 465 L/s [12], dont 20% au maximum devaient être consacré au mécanisme. Une roue à auget alimentée par dessus maximise la puissance pour un faible débit.

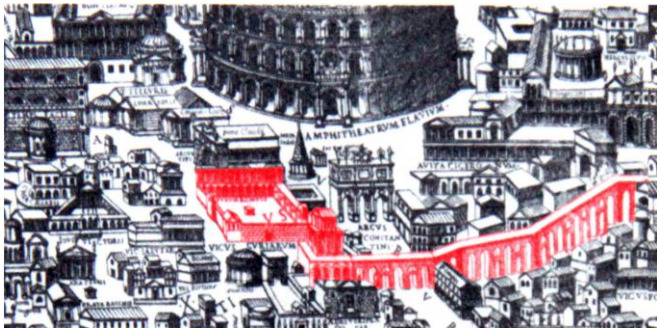


Figure 6: Plan de Rome - PirroLigorio (1561) Arrivée de l'aqueduc

La compréhension des traces dans la maçonnerie a donné lieu à plusieurs hypothèses de restitution du mécanisme:

- en 2013 une première étude réalisée par Matthieu Gabay[13] propose deux mécanismes: un premier de type rouet/lanterne/hérisson avec une cage en bois pour contenir les roues et un second avec un arbre vertical de transmission.

- en 2015 une seconde étude réalisée par Cédric Thireau[14] permet de choisir la transmission par engrenages et calcul la faisabilité des dents pour la transmission des efforts.

- Lors de la conception de la maquette, une disposition des axes des roues d'engrenages tangente au mur annulaire est préférée afin de s'affranchir de la largeur de la colonne maçonnée.

<sup>2</sup> *Aqua Claudia* dont le débit total était estimé à 191,2 m<sup>3</sup>/jour soit 2200 L/s

Le mécanisme est un réducteur de disposition et de forme hypothétiques, avec en entrée une rotation estimée entre 0.5 et 2 t/min et en sortie une rotation estimée entre 1/240 et 1/120 t/min (soit 1 tour entre 4h et 2h). Le facteur de réduction est donc compris entre 60 et 480. Les valeurs d'entrée sont obtenus par le débit et la hauteur de l'aqueduc ; les valeurs de sorties sont arbitraire et correspondent au temps d'un banquet. La puissance disponible en entrée est comprise entre 785 et 1570W pour une roue de 4m de diamètre, un débit de 50 L/s et en fonction du rendement de la roue (compris entre 0.4 et 0.8).

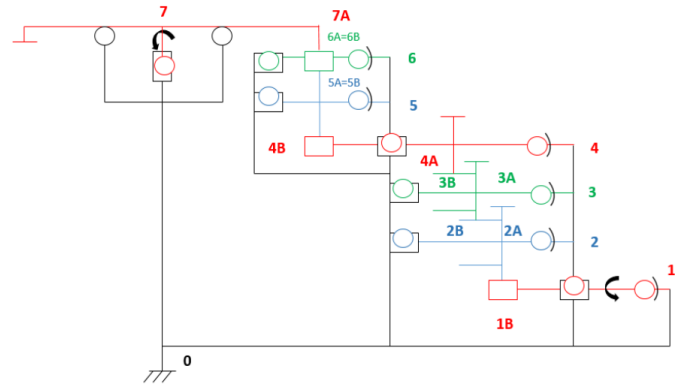


Figure 7: Schéma cinématique du mécanisme supposé

Quelques traces permettent d'envisager un mécanisme à ailettes<sup>3</sup> supportant le plateau de la salle à manger, dont la disposition n'est pas restituée sur la maquette. Le couple résistant maximal du plateau est borné par la valeur de 330kNm. Le calcul prend en compte les hypothèses dans leur pire situation: plateau de 28tonnes, coefficient de frottement de 0.2<sup>4</sup> et disposition des ailettes sur le pourtour. Soit une puissance maximale d'environ 300W. Le surplus de puissance en entrée couvre les pertes d'un mauvais rendement du réducteur (en bois).

Un calcul de dimensionnement des dents a permis de valider l'hypothèse d'un réducteur en 6 roues (+plateau) avec 1 renvoi orthogonal (Figure 7) et des dents en bois de 3 à 8 centimètres de diamètre et hauteur, suivant un modèle statique de poutre en flexion. Une modélisation par éléments finis sous Abaqus a permis de valider certains calculs. Cette modélisation a fait l'objet d'un travail avec un étudiant de l'École Centrale de Nantes.

### III. LA FABRICATION ET L'ASSEMBLAGE

#### A. Le bâtiment

Les délais courts pour la fabrication d'une maquette au 1:80 ont imposé l'utilisation de technique plus contemporaine que les romains. Pour le bâtiment, nous avons opté pour la fabrication additive par *fuseddepositematerial* (FDM) en parallèle sur 4 machines : ultimaker2, Up-Box, Up-Box+ et ZortraxM200.

Le bâtiment est redécoupé manuellement en zones selon les 4 contraintes:

<sup>3</sup> Sphère avec axe de guidage, ancêtre du roulement à bille.

<sup>4</sup> Contact bronze-bronze sans roulement

- La construction architecturale: les étages
- l'échelle d'évidence archéologique: couleurs
- le découpage angulaire : 3 x 1/4 de bâtiment
- les performances de FDM: forme de pièces en dépouilles verticales évite l'usage de supports, améliore la qualité et diminue les temps de fabrication (Figure 8).

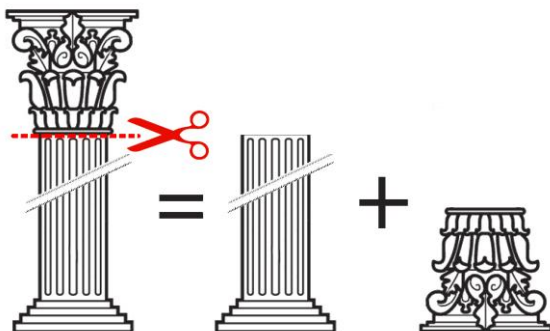


Figure 8: découpage des pièces en forme de dépouilles verticales

Nous obtenons ainsi 106 pièces. Deux matériaux sont utilisés: PLA et ABS. Le PLA a été utilisé pour augmenter la fiabilité de la fabrication des pièces les plus volumineuses (>48h de fabrication). L'incompatibilité des diamètres de filaments (1.75mm et 2.85mm) couplé à des contraintes de variations de teinte d'une bobine à l'autre (pour le musée) limitent l'interopérabilité des éléments de la chaîne de fabrication: par exemple les pièces gris clair devaient être réalisées sur une même machine. La rétractation du matériau n'est pas un problème : les tolérances sont larges : pas de mécanique fonctionnelle ici, mais de l'assemblage de composants architecturaux.

Le temps machine total dédié au bâtiment est estimé à environ 40 jours de fabrication ininterrompue, sans tenir compte de la fiabilité des machines. Le temps de mise à disposition ainsi que les accès étant variable d'une machine à l'autre (accès 12h/jour sauf week-end et disposition 24h/24 pour l'une ; 1h par jour ouvré pour d'autres), il a fallu optimiser le dispatching des pièces pour tenir compte des délais: 17 jours avant livraison (week-end compris).

### B. Le mécanisme

Pour la fabrication du mécanisme après plusieurs échecs en FDM, nous nous sommes tournés vers la découpe laser. Les rouets sont construits par un assemblage d'axe métallique rectifié et de disque de PMMA<sup>5</sup> découpés et pré-perçés. Ces derniers entraînent des hérissons entièrement en PMMA de 3mm d'épaisseur. Lorsque la précision latérale attendue est inférieure à 1/10 de l'épaisseur, la verticalité du laser ne peut pas être réglée avec suffisamment de précision, nous en avons fait l'expérience. Dans ce cas nous nous sommes procuré des roues « catalogues » en POM<sup>6</sup> avec des proportions proches de celles

<sup>5</sup>Polyméthacrylate de méthyle, aussi appelé plexyglas.

<sup>6</sup>Polyoxyméthylène, polymère stable et dur.

attendues (Figure 9). Toutes les roues engrènent par des dents avec des dents en développante de cercle, malgré méconnaissance des techniques romaines antiques. Les essais avec des formes plus « rustiques » ont échoués, probablement (en partie) à cause des imprécisions liées au passage à l'échelle.

Par ailleurs, aucune information archéologique ne documentant les éléments suivant, nous les déterminons expérimentalement :

- usage de coussinets en bronze (autolubrifiant) pour la rotation d'une roue sur son axe
- guidage de la roue le long de l'axe sur une longueur 1/2 diamètre "primitif" pour rester orthogonale à l'axe.
- usage de circlip pour arrêt en translation, en frottement sur les coussinets
- montage de l'arbre sur roulement pour limiter les frottements dû à la tension de la courroie d'entraînement.

Ce réducteur réduit la vitesse de rotation par un facteur d'environ 243. Ce qui est proche de la valeur moyennedestimations archéologiques.

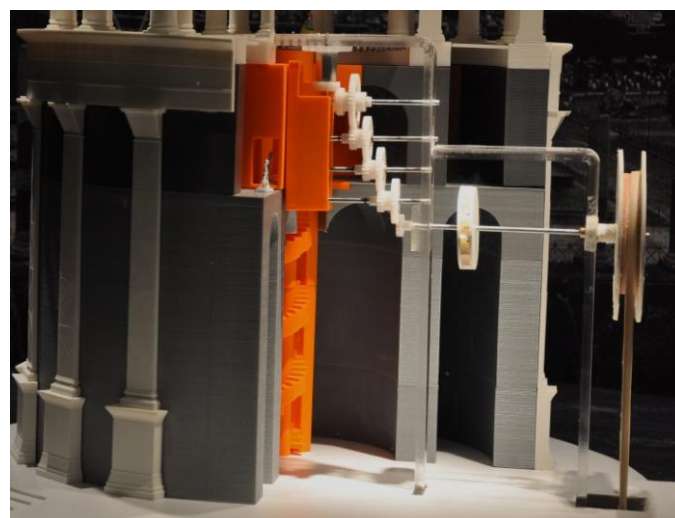


Figure 9: Vue du mécanisme installé, avec la roue provisoire entraînée par la courroie.

L'assemblage des 106 pièces du bâtiment et du mécanisme a été réalisé à Marseille, sur place. Les pièces du bâtiment sont collées, et chaque quart de bâtiment est simple à décoller pour mise-à-jour ultérieure. Les pièces du mécanisme ont été assemblées dans des supports en PMMA et entraînées par une courroie menée par un moteur 36t/min qui simule l'entrée par la roue hydraulique à auget. Cette rotation en entrée est 40 fois plus rapide que la valeur estimée (36t/min au lieu de 0.5 à 2 t/min), ceci permet au visiteur de voir le mécanisme en mouvement, le plateau fait 1 tour en 7 minutes environ (environ 40 fois plus rapide que la vitesse de rotation réelle estimée).

Sur place il a fallu reconcevoir (et construire) la première roue, entraînée par la courroie, pour cause de glissement. Un plus grand diamètre offre davantage de couple et une surface de contact plus grande. Le mécanisme est en place, opérationnel.

#### IV. CONCLUSION

La chaîne de traitement de l'information est complexe: à partir d'un chantier de fouille réel, un **relevé** photogrammétrique permet de **dessiner** une reconstitution 3D des éléments manquants du bâtiment ainsi qu'un système d'hypothèses pour **concevoir** le mécanisme. Ces éléments géométriques sont à nouveau remaniés afin d'être **fabriqués** par FDM d'une part, et découpe laser d'autre part. Enfin l'assemblage des pièces exige une connaissance de l'ensemble du projet. L'interopérabilité des étapes est fragile et dépend de connaissances tacites. Séparer les tâches sans dégradation de l'information le long de la chaîne de traitement semble impossible.

La variabilité des disciplines en jeu et des outils (y compris logiciel) manipulés font de ce projet à taille humaine un ensemble complexe. Le plan de fabrication constitue un problème compliqué, puisque des variables sont interdépendantes (optimisation multi-critère).

Les outils pour résoudre ce type de problème de fabrication (compliqué), pour le suivi de l'information et des pièces jusqu'à assemblage (ensemble complexe), pour assister la conception d'un objet destiné à évoluer sont inexistantes ou inadaptés aux projets de cette envergure.

La maquette, matérialisant un ensemble de connaissances et d'hypothèses est un outil heuristique pour ce consortium interdisciplinaire. Elle permet aux archéologues et ingénieurs de dialoguer sur une base commune et d'envisager de nouveaux développements. C'est une démonstration du principe même de prototypage rapide, qui dépasse ce simple prototypage puisqu'il sert d'objet d'exposition jusqu'à l'été 2017.

#### REMERCIEMENTS

Projet réalisé par le LS2N (*laboratoire des sciences du numérique de Nantes*), Le Musée d'archéologie méditerranéenne de Marseille et l'École française de Rome, en collaboration avec le Laboratoire Arc'Antique, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique et l'entreprise R&C.

Avec la participation de Eléna Puroski (étudiante, Ecole Centrale de Nantes) & Matthieu Gabay.

#### V. REFERENCES

- [1] F. Villedieu, "Une construction néronienne mise au jour sur le site de la Vigna Barberini : la cenatio rotunda de la Domus Aurea ?," *Neronia Electron.*, no. 1, pp. 37–52, 2011.
- [2] G. Timofeev, O. Egorova, and I. Grigorev, "Applying Modern CAD Systems to Reconstruction of Old Design," in *New Trends in Mechanism and Machine Science*, 2017, pp. 323–331.
- [3] A. Dardenay, A. Allroggen-Bedel, H. Eristov, A. Grand-Clément, M.-L. Maraval, C. Marotta, N. Monteix, and E. Rosso, "Herculanum. Des archives aux restitutions architecturales et décoratives," *Chron. des Act. archéologiques l'École française Rome*, Jun. 2016.
- [4] P. Fleury, "La Rome Antique sur l'Internet," *Rev. Inform. Stat. dans les Sci. Hum.*, vol. 33, pp. 146–162, 1997.
- [5] A. Bernard, F. Laroche, S. Ammar-Khodja, and N. Perry, "Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems," *CIRP Ann. – Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 143–148, 2007.
- [6] F. Laroche and C. Rajaofera-Renard, "La réalité augmentée aux Forges de Paimpont Comment mettre en valeur le patrimoine historique et industriel des forges ?," in *Virtual Retrospect*, 2013, pp. 113–120.
- [7] T. T. Allard, M. L. Sitchon, R. Sawatzky, and R. D. Hoppa, "Use of Hand-held Laser Scanning and 3D Printing for Creation of a Museum Exhibit," in *6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, 2005.
- [8] D. Jacobi and Daniel, "La maquette entre reconstitution savante et récit imaginaire dans les expositions archéologiques," *La Lett. l'OCIM*, no. 123, pp. 15–23, May 2009.
- [9] M. Vicentini, "Reconstitution de la machine d'Anticythère," *musée du CNAM*, 2011.
- [10] N. André and F. Villedieu, "L'apport de la photogrammétrie numérique à l'analyse architecturale en archéologie," in *Photogrammétrie Numérique et perception 3D: les nouvelles conquêtes (SFPT - ENSG)*, 2016.
- [11] P. Aparicio Resco and C. Figueiredo, "Scale of historical evidence," *Arquelogia y patrimonio virtual*, 2014. .
- [12] S. I. Frontinus, *De Aquaeductu Urbis Romae*. 96AD.
- [13] M. Gabay, "Cenario Retonda," Rapport Ecole Française de Rome, 2013.
- [14] C. Thireau, "Résistance des matériaux appliqué au mécanisme de la salle à manger tournante de Néron," Rapport Ecole Centrale de Nantes, 2015.