

LES INSTRUMENTS TECHNIQUES ET LE PATRIMOINE INDUSTRIEL : CONSERVATION, VALORISATION ET MAINTENANCE

Marie-Anne Loeper-Attia, Emmanuel Aguila

Résumé Les collections patrimoniales ayant une forte valeur d'usage sont régulièrement soumises à la contrainte de la mise en état de fonctionnement ou de jeu. Les instruments scientifiques, techniques, horlogers et de musique ne font pas exception. En préalable à ces choix d'intervention, doit se poser la question de l'authenticité du bien culturel concerné car ce type de patrimoine a été sujet à de nombreux remaniements, rénovations qui ont bien souvent « dénaturé » l'objet originel. Les possibilités techniques de mise en état de fonctionnement doivent être également évaluées au regard de l'état de conservation de l'objet et du projet culturel qui lui est associé. Une fois ces points abordés, illustrés par de nombreux exemples issus de ces différents domaines, des solutions alternatives et complémentaires de modélisation informatique seront également présentées.

Abstract Heritage collections with a high usage value are regularly subjected to the constraint of being in working or playing conditions. Scientific, technical, horological and musical instruments are no exception. Prior to these choices of intervention, must be raised the question of the authenticity of the cultural property in question because this type of heritage has been subjected to numerous adaptations, renovations that have often « altered » the original object. The technical possibilities of being in an operable condition must also be assessed in relation to the condition of the object and the cultural project it is associated with. Once these points addressed, illustrated by numerous examples from these different areas, alternative and complementary computer modelling solutions will also be presented.

Resumen Las colecciones patrimoniales con alto valor de uso son puestas regularmente en estado de funcionamiento. Los relojes, los instrumentos científicos, técnicos y de música no son una excepción. En estos, antes de elegir la intervención, se debe contemplar la cuestión de la autenticidad de los bienes culturales concernidos, porque este tipo de patrimonio ha sido objeto de muchos cambios, renovaciones que a menudo han transformado el objeto original. Las posibilidades técnicas para el restablecimiento de condiciones de funcionamiento también debe ser evaluado en función del estado de conservación del objeto y del proyecto cultural asociado. Una vez tratados estos temas, ilustrados por numerosos ejemplos de estas áreas, también se presentarán soluciones alternativas y complementarias de modelización por ordenador.

Mots-clés patrimoine technique, restitution au public, maintenance, restitution 3D.

Avec le patrimoine industriel, ce sont les valeurs de document et de témoignage qui sont mises en avant. Il illustre des fonctions, des évolutions, des systèmes techniques où la part de l'aspect humain est prépondérante. Le mouvement pour la valorisation du patrimoine industriel est apparu dans les années 70 en Angleterre, poussé par un groupe de professeurs qui considéraient ces biens culturels comme des biens archéologiques, dont les études fournissaient des informations sur les techniques, les usages de travail et les modes de vie qu'on ne pouvait obtenir d'une autre façon. C'est pourquoi on parla au départ d'archéologie industrielle. Aujourd'hui, les présentations muséales de ce type de bien culturel tendent à respecter à la fois non seulement l'intégrité de l'objet, mais aussi son authenticité par rapport à ses fonctions d'origine ou ultérieures.

Comment caractériser un objet scientifique et technique ?

Pour bien cerner cette authenticité, il est nécessaire de bien décrire et donc comprendre un objet du patrimoine technique et scientifique (conférence de Bruno Bachimont, Journées de l'INCAA-F Marseille 2014, non publiées).

Un objet technique ne peut fonctionner que s'il peut être restitué dans ses trois cohérences :

- la cohérence interne qui relève de son intelligibilité et de son mode de fonctionnement. Cela recouvre l'ensemble des connaissances scientifiques permettant de comprendre pourquoi l'objet fonctionne;
- la cohérence concrète qui comprend le système technique et la connaissance des ses conditions pratiques de fonctionnement et de son intégration dans le milieu technique associé;
- la cohérence externe qui relève du milieu socio-culturel dans lequel l'objet est produit, de sa valeur et de sa signification, de son interprétation esthétique, juridique et sociale.

Pour un objet patrimonial industriel, il est indispensable de retrouver son milieu et les connaissances associées. Les partenaires possibles sont le scientifique pour ce qui relève du savoir, l'ingénieur pour la matière et le rhéteur pour l'argumentation. Or, le cycle de renouvellement des connaissances se renouvelle plus vite que le cycle de renouvellement de l'objet technique, ce qui fait qu'un objet technique peut être frappé d'obsolescence (s'il n'y a plus de milieu technique associé, tel qu'un fournisseur), même si l'instrument est encore opérationnel. Plus le système est complexe, plus il sera obsolète rapidement.

Un cas pratique : la machine de Wimshurst

C'est une machine électrostatique inventée en 1882 par l'anglais James Wimshurst. Elle fut historiquement utilisée pour illustrer de nombreux phénomènes d'électricité statique ou la production d'ozone dans un arc électrique (**fig. 1**).

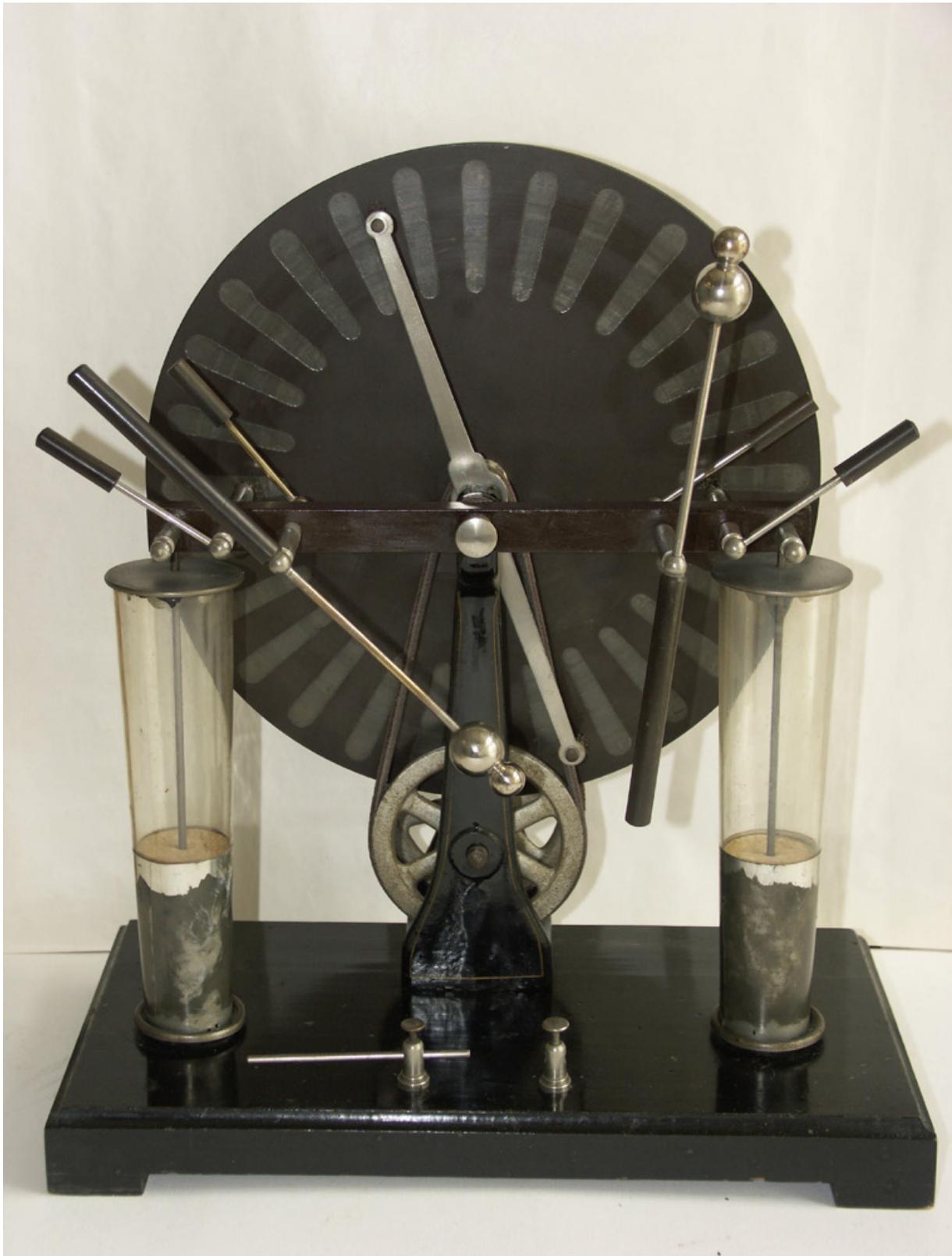
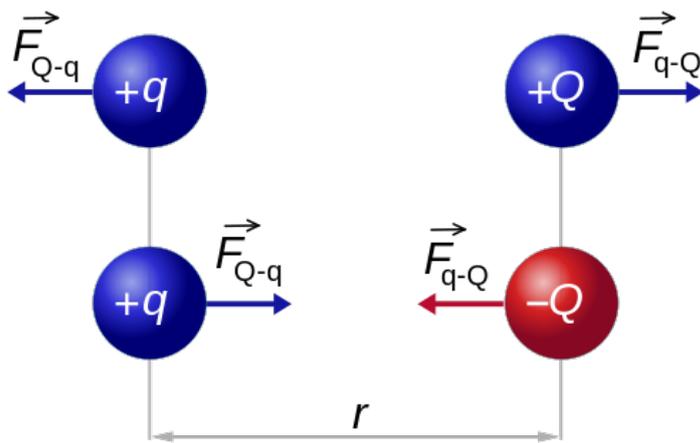


Figure 1 Machine de Wimshurst © Marie-Anne Loeper-Attia.



$$|\vec{F}_{Q-q}| = |\vec{F}_{q-Q}| = k \frac{|q \times Q|}{r^2}$$

Figure 2 Loi de Coulomb. Par I, Dennis Nilsson, CC BY 3.0, extraite de : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3448720>

font à l'aide d'un dispositif de balais à friction, permettant ainsi de récupérer la charge et d'emmagasiner l'énergie dans les bouteilles de charges : c'est le principe du condensateur. Situé au voisinage de pointes métalliques adéquatement connectées, et reliées à deux sphères convenablement disposées

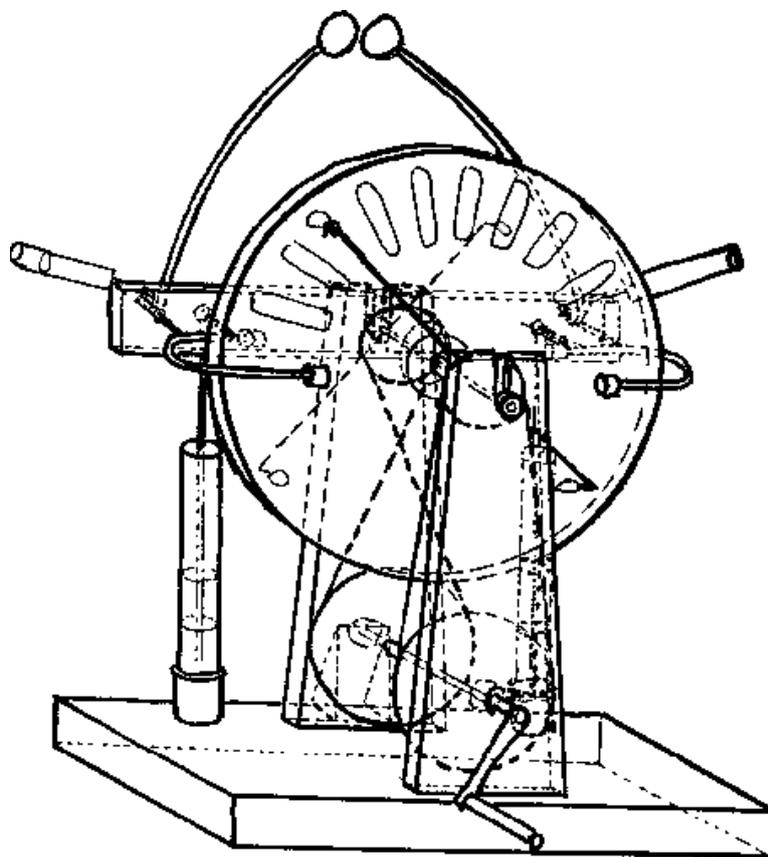


Figure 3 Fonctionnement de la machine de Wimshurst
© Emmanuel Aguila.

La cohérence interne de cet objet est associée à la loi de Coulomb, qui exprime en électrostatique la force de l'interaction électrique entre deux particules chargées électriquement (**fig. 2**).

La cohérence concrète relève du système technique. Cette machine est équipée de deux larges disques constitués de matériaux isolants et recouverts de secteurs métalliques. Les deux disques tournent en sens opposé l'un par rapport à l'autre dans un plan vertical, les connexions se

à une distance pouvant provoquer un étincelage, ce dispositif se nomme « éclateur » (**fig. 3**).

Sa cohérence externe relève de sa valeur et de sa signification. Cette machine est à la base de l'utilisation de générateurs pour les rayons Röntgen (ou rayonnement X) puis la radiothérapie. Cette machine a été utilisée aussi beaucoup dans des écoles comme outil pédagogique pour réaliser des expériences d'électrostatique. On en trouve actuellement de nombreux exemples dans des musées comme le Museum of Science and Industry de Chicago, le musée national de l'Éducation de Rouen ou le CNAM.

Quelles stratégies pour un musée

Elles sont multiples :

Les stratégies	Les moyens
La conservation « figée »	Conserver les contenus et les machines tels quels
La migration	Faire évoluer les contenus. Repose sur les savoir-faire du moment.
L'émulation	Conserver les contenus mais simuler les machines anciennes pour exploiter les contenus sur des machines actuelles.
La description	Décrire l'ensemble et son exploitation pour pouvoir les reproduire.
La distribution	Confier au réseau de multiples « copies » pour multiplier la probabilité de conserver une copie pour l'avenir.

En fonction des options choisies, les opérations à mener seront très différentes, incluant soit une intervention minimale, soit un changement ou refabrication de pièces ou, enfin, si l'original ne peut être remis en état d'usage, la création de copies ou de fac-similés. La dernière option permet certes à la copie ou au substitut de servir de bouclier contre l'usure de l'original, mais elle émousse la valeur et la conscience de cet original.

Le terme de copie apparaît au XVIII^e siècle et sous-entend la notion de copie conforme, de reproduction à l'identique d'une œuvre d'art originale.

Le premier usage attesté du terme fac-similé est anglais et relève d'une terminologie juridique : c'est ainsi qu'on désigne au XVII^e siècle la copie d'un document légal certifié conforme par une autorité établie. Plus que l'idée de copie en elle-même, c'est la fidélité au contenu du texte reproduit et non nécessairement à son allure qui paraît d'abord essentielle (Netchine 2010).

Il est possible d'avoir un fac-similé partiel, pour des parties d'instruments particulièrement endommagés par l'usure mécanique, ou un fac-similé d'objet technique entier. Le composant défaillant est remplacé par un similaire ayant les mêmes propriétés, sans forcément en être la réplique exacte. Ce remplacement peut être temporaire, pour le temps de l'expérimentation, ou continu (Getreau 2010). Mais cela impose que soit on garde plusieurs exemplaires pour simuler un système d'approvisionnement, ce qui revient à cannibaliser d'autres outils, soit on forme des techniciens pour pallier la disparition des formations sur le sujet.

Que faut-il choisir : copie ou fac-similé?

Le substitut idéal doit faire la synthèse des deux fonctions dévolues aux objets patrimoniaux : l'explication (connaître) et l'apparence sensible (montrer). Le substitut analogique tente de reproduire l'original point par point (clone) ou d'en simuler l'apparence intuitive; il se rapproche de ce que l'on peut entendre par « copie ». Le substitut analytique néglige l'apparence sensible de l'original et vise seulement à en révéler les articulations et la logique propre; c'est le fac-similé. Il y a une alternative entre ces deux catégories de substituts, qui doit s'inscrire dans un projet de connaissance délibérément conçu comme différent de l'original. La copie est ici une simple doublure, le fac-similé pouvant alors être considéré comme

un original qui s'ignore (Deloche 2001). Nous verrons plus loin une nouvelle option permettant d'associer ces deux notions.

Quel bon usage pour un objet technique?

Il est primordial de définir en premier lieu le mode et la fréquence de fonctionnement avec un cahier des charges adapté. La mise en marche peut être ainsi continue, occasionnelle ou rare. À cela il faut ajouter la mise en place d'une maintenance¹ qui doit être ajustée à l'usage prédéfini. Bien souvent, on pense à tort que celle occasionnelle sera plus rapide et simple que celle faite lors d'une utilisation en continu de l'objet, or il n'en est rien. Les pièces n'étant pas en fonctionnement continu, les produits utilisés pour leur maintenance ne sont plus forcément adaptés. Enfin, les phases de repos de la machine peuvent permettre à la corrosion ou à d'autres phénomènes de dégradation de s'installer, surtout si le climat n'est pas forcément régulé, comme cela peut l'être dans des locaux industriels où ces machines sont entreposées. Un des aspects particulièrement sensibles de cette maintenance, dans le cas d'objets techniques avec une mise en marche occasionnelle, est la lubrification des composants mis en mouvement.

En effet, il est assez aisé lors du démontage de la pièce de voir si les éléments sont mécaniquement suffisamment résistants, ne présentent pas de fissures, cassures ou fragilités internes. Une observation visuelle, sous loupe binoculaire ou par imagerie par rayons X permet d'avoir une bonne visualisation de l'état externe et interne des pièces. Par contre, le phénomène de mise en mouvement de pièces génère des micro-abrasions ou écrasements qui ne se voient pas forcément à première vue et qui, à moyen terme, portent irrémédiablement préjudice à la fonction d'usage. Pour pallier cela, il est indispensable de lubrifier tous les composants en mouvement.

La lubrification permet de :

- réduire l'usure;
- diminuer la perte d'énergie par frottement, limiter l'échauffement;
- prévenir la corrosion;
- homogénéiser la conduite des rouages;
- nettoyer les points de frottement.

Les qualités d'un lubrifiant :

- stable chimiquement;
- bonne tenue en place;
- bonne résistance au cisaillement;
- ne pas être soumis au phénomène d'évaporation;
- comportement stable (viscosité constante) dans des conditions environnementales variables (température, humidité relative);
- bonne capacité de mouillage.

¹ La maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé (norme AFNOR 15898).

Un lubrifiant « type » est constitué des trois composants suivants :

- des huiles de base : entre 80 et 95 %;
- un épaississant : entre 5 et 20 %, qui assure une cohésion au lubrifiant;
- des additifs : entre 0 et 10 %, voire plus dans certains cas.

Il existe différents types de graisses : les graisses à savon lithium / calcium, les graisses à savon lithium complexe ou encore les graisses à savon aluminium complexe...

Néanmoins la plupart de ces lubrifiants vieillissent, soit par oxydation des huiles, évaporation des liants ou encore par action de la température d'échauffement. Dans le cas d'une conservation et exploitation muséale de l'instrument, ce dernier point peut poser problème et nous incite à essayer de chercher d'autres types de composés.

Une autre catégorie de lubrifiants est celle de la lubrification sèche. Ces lubrifiants ont l'avantage de présenter une grande stabilité chimique, de pouvoir jouer le rôle de matériau sacrificiel de contact et donc de protéger de manière pérenne la surface métallique. Ils peuvent être composés entre autre de dépôts de carbone, de graphène ou de céramiques ternaires (TiSiC) formées par l'association de carbone, silicium et titane. De nombreuses études sont en cours sur ces matériaux, qui semblent être prometteurs dans notre cas (Cornet 2013).

En tout cas, la plupart des lubrifiants qui existent sont conçus pour des utilisations spécifiques (continues ou fractionnées) qui peuvent être différentes de celles prévues par le cahier des charges et les objectifs muséaux. Il n'est donc pas toujours possible d'utiliser les mêmes lubrifiants que lorsque l'objet était en état de fonctionnement et il faut choisir le lubrifiant en fonction du nouveau cahier des charges demandé.

Dans le cas où la mise en état de fonctionnement, même temporaire, n'est pas possible ou voulue, il existe encore une autre alternative à la copie ou au fac-similé : la modélisation 3D. Celle-ci peut s'inscrire à mi-chemin entre les deux notions rappelées plus haut : les substituts analogique et analytique, puisqu'elle permet de rendre intelligible la fonctionnalité de l'objet tout en en donnant une image identique à l'original.

Numérisation et modélisation 3D

La modélisation et la numérisation en trois dimensions des objets sont de plus en plus utilisées dans le domaine de la restauration du patrimoine et de l'étude des œuvres d'art. Ces techniques consistent à recréer des versions virtuelles des objets. Elles peuvent être utilisées comme une aide technique à la restauration et permettent aussi des projets de communication et de vulgarisation appréciés par le public et facilités par les équipements numériques grandissants des musées.

Elles commencent à s'imposer aujourd'hui dans le patrimoine scientifique et technique, notamment dans les domaines mécanique et horloger, où elles permettent de révéler les secrets des mécanismes et le fonctionnement des objets.

Les termes de numérisation et de modélisation sont généralement employés comme synonymes alors qu'il existe une différence, ne serait-ce que dans l'étymologie des mots. Si on se réfère au Larousse, la numérisation consiste à « convertir une information analogique sous forme numérique » tandis que la modélisation est « la conception d'une représentation schématique ». On parlera donc de numérisation lorsqu'un traitement informatique permet de passer de l'objet réel à une version virtuelle, par exemple par le traitement informatique de

photos. Le terme « modélisation » sera employé lorsqu'on crée informatiquement une copie de l'objet en créant chaque pièce dans un logiciel puis en les assemblant informatiquement. Il y a donc une subtilité dans la terminologie qui concerne principalement la méthode utilisée pour créer la copie numérique. L'objectif final de chacune de ces méthodes est d'obtenir un modèle en 3D d'un objet. Il est d'ailleurs courant de combiner les deux méthodes, par exemple en utilisant la numérisation pour avoir un rendu de matière réaliste et la modélisation pour donner un « corps » à l'objet, sur lequel on pourra interagir.



Figure 4 Les scanners 3D du mécanisme d'Anticythère (Musée national archéologique d'Athènes) ont permis de retrouver sous la corrosion des informations écrites sur les rouages en bronze, et ainsi d'en comprendre le fonctionnement (extraite de Wikipédia).

Il existe différentes manières de numériser en 3D. On dispose de scanners numériques très performants pour numériser une enveloppe en trois dimensions, comme une sculpture. Le principe consiste à prendre de nombreuses photographies (ou radiographies) sous différents angles et les combiner informatiquement afin d'obtenir un modèle en trois dimensions. Les résolutions des scanners permettent de visualiser des détails parfois invisibles à l'œil nu ou cachés sous une couche de corrosion

(Ramsey, 2007). Ces versions sont d'un grand réalisme et permettent d'étudier précisément sous tous les angles des objets parfois fragiles ou difficiles à manipuler (Nicolas *et al.*, 2016). Les techniques actuelles permettent de numériser tout type de matériaux – pierre, bois, tissu, métal (**fig. 4**).

Les numérisations sont utilisées comme aide à la restauration, notamment lorsqu'elles facilitent la restitution des parties manquantes. La copie numérique d'une œuvre permet de retrouver la forme de la partie à combler. Il est possible de procéder ensuite à l'impression 3D des parties reconstituées. Ces techniques sont très efficaces sur les objets symétriques, lorsque la partie manquante peut être dupliquée directement sur le modèle numérique avant d'être imprimée et venir combler le manque. La numérisation du plan de cassure avec une grande précision permet de fabriquer des pièces de comblement qui viennent s'insérer très précisément sur l'objet.

La numérisation devient plus complexe lorsqu'il s'agit d'objets techniques et mécaniques. Il est difficile de scanner entièrement l'intérieur d'un mécanisme, certaines pièces sont cachées, d'autres sont imbriquées ou superposées. Il est souvent nécessaire de démonter entièrement ou partiellement ces objets. On préférera ici une modélisation individuelle de chacune des pièces de l'objet, en particulier lorsqu'il s'agit d'engrenages. Ces pièces virtuelles seront ensuite assemblées informatiquement pour obtenir des modélisations fonctionnelles reproduisant le mouvement de l'objet.

Plusieurs méthodes permettent d'obtenir ce résultat. La première consiste à animer individuellement chaque pièce de façon coordonnée pour donner l'illusion du mouvement. La seconde repose sur des interactions physiques virtuelles créées entre les pièces. Il suffit ensuite de donner un mouvement à la première pièce du mécanisme pour que les pièces suivantes s'animent automatiquement. Selon les logiciels utilisés, il est possible réaliser des calculs de forces ou de contraintes et des estimations d'usure. Tout cela contribue à une meilleure connaissance de l'objet et peut aiguiller sa restauration. Ces modélisations sont déjà utilisées dans d'autres domaines, comme en peinture avec la modélisation de la tension d'une toile dans son cadre (Gril *et al.*, 2007). Les logiciels font généralement appel à la méthode des éléments finis, technique issue du milieu de l'ingénierie et utilisée pour modéliser des ponts ou des bâtiments (De Luca, 2006). Ces études numériques des interactions et des contraintes sont très performantes et créent de nouvelles passerelles de travail entre les ingénieurs et les restaurateurs.

Fonctionnalité du patrimoine horloger et modélisation

La reproduction numérique d'un fonctionnement est très intéressante dans le domaine de la restauration des œuvres issues du patrimoine mécanique et horloger. Les problèmes rencontrés lors du choix de la remise en fonction sont nombreux et, même si ces objets ont été intrinsèquement conçus pour fonctionner, il faut s'assurer de la pertinence d'une remise en fonction selon l'état de conservation de l'objet et selon les apports d'une modélisation.

Il convient toujours de préserver au maximum la matérialité de l'œuvre et donc sa cohérence concrète. Il est courant de rencontrer des mécanismes complets qui comportent toutefois des pièces cassées ou abîmées empêchant le fonctionnement. Il peut être nécessaire de refabriquer les pièces défectueuses en lieu et place des pièces originelles, qui seront remises dans un lieu différent, avec tous les risques que cela comporte. Il faut alors trouver la limite éthique de l'intervention. Remplacer la moitié des pièces d'un mécanisme pour le voir fonctionner entraîne une perte d'informations techniques et ne présente plus un grand intérêt patrimonial. Dans ce cas de figure, la modélisation et la numérisation doivent venir se substituer à l'intervention technique.

On traitera différemment le manque de pièces dans un mécanisme. Leur restitution matérielle permet de redonner une cohérence interne à l'objet. Cela permet de rétablir sa compréhension ainsi que sa fonctionnalité perdue, sans modification de la matérialité restante. Une restitution numérique peut aussi dans ce cas éviter une intervention trop lourde sur l'objet tout en rétablissant la cohérence interne.

Un cas symptomatique concerne les horloges présentes dans les musées. Le sens concret des horloges augmente considérablement lorsque les balanciers sont animés et que les cloches sonnent au passage des heures. Il faut cependant que les horloges affichent une heure juste sous peine d'être, au contraire, dénigrées pour cause de mauvais fonctionnement. Il n'est pas

nécessaire de faire fonctionner une horloge astronomique du xvi^e siècle dont la précision de marche est de plus ou moins 20 minutes par jour, même si le mécanisme peut le supporter parfaitement. L'objet serait alors jugé pour la mauvaise précision des balanciers à foliot de l'époque, alors qu'il devrait être apprécié pour la qualité de sa conception et de son exécution. Il peut alors être plus profitable de présenter une modélisation numérique permettant d'expliquer les spécificités du mécanisme.

Les horloges, ainsi que d'autres instruments scientifiques, peuvent aussi présenter des complications astronomiques qui complexifient d'autant plus le questionnement sur leur remise en fonction. Ces complications astronomiques se déroulent sur des grandes périodes de temps, comme par exemple un dispositif affichant les différentes phases de la lune qui effectue un tour en 29,5 jours. Cela peut même être bien plus long, avec des dispositifs tournant sur plusieurs années. Un planétaire mécanique, qui reproduit la révolution des astres autour du soleil, fera effectuer une révolution de Jupiter autour du soleil en plus de 11 ans.

Bien que ces complications « paraissent » immobiles, elles sont actives en permanence, souvent avec une grande précision, ce qui les rend remarquables. Le débat s'oriente alors autour de la pertinence de faire fonctionner à nouveau des dispositifs que personne ne verra jamais « instantanément » fonctionner. La question se pose d'autant plus si la mécanique nécessite une restauration importante. Dans ce cas, la modélisation est parfaitement adaptée pour se substituer à la remise en fonction de l'objet. Elle permettra aussi de faire varier les vitesses de révolutions des astres ou encore de présenter spécifiquement une partie du mécanisme qui présente un intérêt particulier.

Lorsque ces mécanismes à complications autorisent une remise en fonction, ils doivent alors être accompagnés d'outils de médiation permettant de saisir l'ensemble du projet. Il ne semble pas nécessaire de faire tourner une planétaire mécanique, qui paraîtra immobile si aucune information ne le signale. Il faut mettre en valeur ce type d'objet en lui associant des modélisations permettant de comprendre les mécanismes ou des cartes du ciel actives pour comparer la position des planètes (fig. 5).

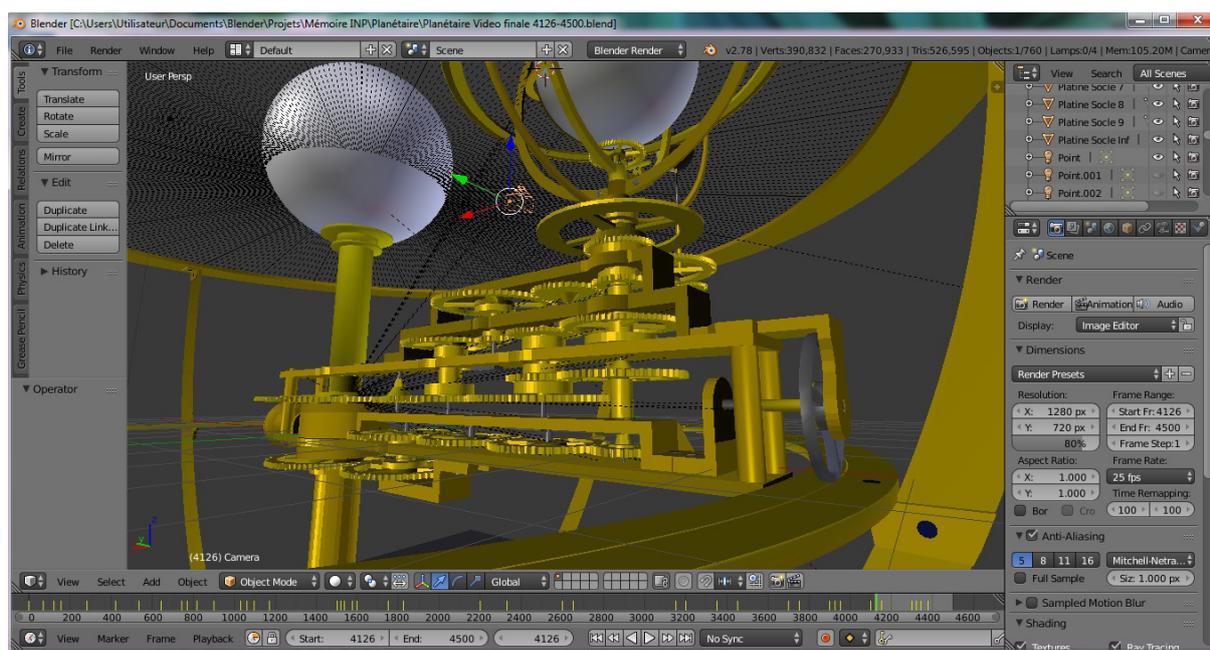


Figure 5 Mécanisme en cours de modélisation 3D © Emmanuel Aguila.

En plus de tous ces aspects fonctionnels, remettre en fonctionnement un objet mécanique entraînera nécessairement un questionnement autour des usures. Il s'agit d'objets nécessitant une lubrification et une maintenance pour minimiser l'usure. Les usures ne peuvent pas être totalement éliminées, même avec le lubrifiant parfait. Le vieillissement des lubrifiants est un des problèmes majeurs à ne pas négliger. Lorsque les huiles sont sèches et polymérisées, les usures se développent alors de manière exponentielle et, en quelques années, des dégâts très importants peuvent se créer. Cette question doit être abordée selon la qualité spécifique de chaque mécanisme et selon les possibilités de restauration et de modélisation.

Exemple de l'horloge astronomique de Jean Naze, musée de la Renaissance d'Ecouen

Cette horloge astronomique de table date du XVI^e siècle. La précision journalière de l'horloge est faible aujourd'hui mais elle était très bonne pour l'époque. Un boîtier recouvre entièrement le mécanisme et, d'un point de vue externe, il est impossible de saisir les subtilités du fonctionnement. Il existe un risque de détérioration du mécanisme lors de la remise en fonction, car certains engrenages ne respectent pas la théorie moderne de l'horlogerie. Le mécanisme a été conçu pour pouvoir calculer de nombreux phénomènes (phases de la lune, heures de lever et de coucher du soleil, position du ciel astral...) avec le moins d'engrenages possibles, mais sans tenir compte des problèmes d'usure et de tribologie, qui ne seront vraiment pris en compte qu'au XVIII^e siècle.

Le mécanisme est complet et possède donc des particularités techniques intéressantes et une grande ingéniosité dans sa conception. Il s'agit d'un témoignage technique de la mécanique du XVI^e siècle extrêmement important, qu'il faut conserver en l'état, sans changement de pièces ou modification, afin de conserver les traces techniques d'usinage et de préparation des alliages métalliques.

Il a donc été décidé de protéger l'original par une conservation curative – nettoyage des huiles et des produits de corrosion, mise en valeur du travail de gravure, protection des surfaces – et de le présenter à l'arrêt. Une modélisation complète de l'objet a été réalisée afin de concevoir une vidéo présentant l'ensemble des spécificités du mécanisme, ainsi que des schémas indiquant les informations affichées par l'horloge (fig. 6 et 7).



Figure 6 Horloge astronomique de table, Jean Naze, XVI^e siècle, musée national de la Renaissance d'Ecouen © Emmanuel Aguila.



Figure 7 Image tirée de la modélisation 3D de l'horloge permettant de dévoiler une partie du mécanisme des complications astronomiques © Emmanuel Aguila.

Transmettre, étudier et valoriser

La numérisation et la modélisation en trois dimensions des objets mécaniques s'inscrivent donc dans la démarche de transmission et de préservation du patrimoine. La simulation d'un fonctionnement permet de protéger les objets contre les usures ou les dysfonctionnements, tout en mettant en lumière leurs spécificités.

La modélisation est aussi une sauvegarde numérique (Vergniew, 2005) permettant de conserver un grand nombre d'informations (profil d'une roue, nombre de dents, diamètre de l'axe...). Elle peut être utilisée en cas de perte, de vol ou d'accident pour retrouver un état précis de l'objet à un instant donné (Pitzalis, 2013). Ces modèles permettent aussi aux spécialistes de la discipline de partager des connaissances techniques. C'est une méthode de description « moderne » d'un objet, permettant d'éviter les descriptions complexes expliquant le fonctionnement des mécanismes.

Ces modélisations permettent aussi d'augmenter substantiellement la cohérence concrète et interne de l'objet. La présentation de schémas, de vidéos ou d'autres outils de médiation améliore la compréhension et valorise au mieux ce type d'instrument en augmentant le temps de présence du public. Il est important de mettre en valeur ces objets dont l'intérêt repose sur leur mécanique, qui peut être malheureusement incomplète ou dans l'impossibilité de fonctionner. Il est alors possible de reproduire tout ou partie d'un mécanisme afin de le présenter dans son ensemble ou d'insister sur une complication particulière.

Enfin, il ne faut pas négliger l'aide à la restauration qui est apportée par ces nouvelles techniques. Qu'il s'agisse de reproduire des manques ou de modéliser des contraintes mécaniques, la numérisation et la modélisation 3D sont d'ores et déjà des acteurs importants de la restauration du patrimoine.

Références bibliographiques

- E. Cornet**, « Vers une lubrification sèche pour le patrimoine horloger », *CeROArt* [En ligne], 4 | 2014, mis en ligne le 2 avril 2014, consulté le 4 juillet 2017. URL : <http://ceroart.revues.org/4151>
- B. Deloche**, « Et si le substitut valait plus que l'original ». Dans *Du moulage au fac-similé, diffusion du patrimoine et conservation préventive*, Cahier technique n° 8, Paris, ARAAFU, 2001.
- J. Gril, J. et al.**, « Le cas de la Joconde : modélisation mécanique de l'action du châssis-cadre ». Dans *Conserver aujourd'hui : les « vieillissements » du bois*, actes de la journée d'étude, cité de la Musique, 2 février 2007.
- F. Getreault**, « L'évolution de la notion de copie en facture instrumentale ». Dans *Utopia Instrumentalis*, actes du colloque, musée de la Musique, Paris, 27/11/2010. http://www.citedelamusique.fr/pdf/insti/recherche/utopia/18_actes.pdf.
- T. Nicolas, R. Gagne, C. Tavernier, V. Gouranton, B. Arnaldi**, « La tomographie, l'impression 3D et la réalité virtuelle au service de l'archéologie », *Les Nouvelles de l'archéologie*, n° 146, Maison des Sciences de l'Homme, 2016, p. 16-22. Cette version : <hal-01417753> <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01417753/document>.
- L. De Luca**, *Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural - Définition d'une approche hybride pour la reconstruction 3D d'édifices*, thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des Arts et Métiers, 2006. Cette version : Sciences de l'Homme et Société. Arts et Métiers Paris-Tech, 2006. Français. <NNT : 2006ENAM0009>. <tel-00263717> <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00263717/document>
- E. Netchine**, « La copie, Faire voir, faire preuve et faire apprendre ou le fac-similé dans l'édition savante, littéraire et bibliophilique du XVIII^e au XIX^e siècle ». Dans *Utopia Instrumentalis*, actes du colloque, musée de la Musique, Paris, 27/11/2010. http://www.citedelamusique.fr/pdf/insti/recherche/utopia/18_actes.pdf.
- D. Pitzalis**, *3D et Sémantique : nouveaux outils pour la documentation et l'exploration du patrimoine culturel*, mémoire de thèse de doctorat, université Paris 6, direction de recherche : Matthieu Cord, co-encadrement : Franco Niccolucci, 2013.
- A.T. Ramsey**, « The latest techniques reveal the earliest technology – A new inspection of the Antikythera Mechanism ». Dans *DIR 2007 - International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography*, June 25-27, Lyon (France), 2007.
- R. Vergnieux**, « Archeogrid : vers un conservatoire national des données 3D du patrimoine ». Dans *Virtual Retrospect 2005, Archéovision 2*, actes du colloque, Bordeaux, Éditions Ausonius, 2006.

Les auteurs

Marie-Anne Loeper-Attia Diplômée du Master de conservation - restauration des objets d'art (université de Paris I) et d'un DEA d'archéologie des périodes historiques (université de Paris I - Sorbonne). Depuis septembre 2002 : assistante responsable de l'atelier Métal du département des Arts du Feu, à l'Institut national du patrimoine (INP) – département des restaurateurs. Depuis novembre 2005 : chargée de conservation-restauration dans le cadre des activités de recherche et de restauration du musée de la Musique-Philharmonie de Paris (contrat à mi-temps). En parallèle, développe une activité de conseil en conservation préventive et de restauration pour divers musées comme le musée du Louvre, le Cabinet des médailles de la Bibliothèque nationale, les Arts décoratifs, le CNAM et autres musées nationaux.

Emmanuel Aguila 2001-2006 : diplôme d'ingénieur en structures des matériaux, ENSEEG, Grenoble. — 2010-2015 : diplôme de restaurateur du patrimoine, INP, Paris. — 2015- aujourd'hui : co-gérant de Atelier CHRONOS – Conservation-restauration d'horlogerie et d'instruments scientifiques et techniques, Dinan (22).