

# Reconstruction de l'horloge Collin de Notre-Dame

Denis Roegel

1<sup>er</sup> mai 2020

Contact : [horlogeXparisXnotreXdame@gmail.com](mailto:horlogeXparisXnotreXdame@gmail.com) (remplacez X par .)

## Les faits

Le 15 avril 2019, la charpente de la cathédrale Notre-Dame de Paris a brûlé et avec elle l'horloge Collin installée vers 1867 a été détruite. L'horloge a dû faire une chute de 30m et se retrouve en bien piteux état, la plupart des éléments brisés, recouverts de plomb et méconnaissables.

De février à avril 2020, j'ai entièrement modélisé l'horloge, sur la base de relevés que j'avais faits. Mais d'abord, un peu de chronologie :

## Chronologie

Le soir du 15 avril 2019, j'ai tout de suite eu une pensée pour l'horloge. J'ai alors décidé de proposer sa reconstruction aux responsables du patrimoine, sachant notamment que j'étais vraisemblablement le seul à avoir un certain nombre de données techniques. J'avais toutefois dans l'idée de produire un dossier solide, avec notamment des références vers des constructeurs potentiels. Le 16 avril, j'ai envoyé un message à quelques personnes, dont l'horloger Jean-Baptiste Viot (auteur de la restauration clandestine de l'horloge du Panthéon), pour leur demander si elles étaient d'accord pour que je les cite dans mon projet :

Date: Tue, 16 Apr 2019 12:52:14 +0200  
Subject: reconstruction de l'horloge de Notre-Dame  
To: JB <jbvivot@free.fr>

Bonjour,

je prévois d'écrire au Gouvernement pour proposer la reconstruction de l'horloge de Notre-Dame. Il se trouve que je dispose de relevés et de nombreuses photographies et il est possible de faire une reconstruction fidèle. Je souhaite faire un petit projet préliminaire pour faire un état des lieux et indiquer des noms de diverses personnes susceptibles d'intervenir ou de donner des conseils pour cette reconstruction. La question est surtout de savoir qui sont les personnes les plus

à même de reconstruire des roues dentées avec les profils de l'époque (à partir de mes photographies), ainsi que le châssis en fonte, etc. Est-ce que je peux mettre votre nom sur la liste des experts ?

On notera que j'avais notamment insisté sur la question des profils de dents, parce que tellement d'horloges ont été reconstruites ou restaurées avec des profils anachroniques.

Je n'ai malheureusement pas eu de réponse de J.-B. Viot mais le 17 avril j'ai tout de même envoyé mon projet à quelques responsables du patrimoine, en citant J.-B. Viot et d'autres. En même temps, j'ai appris que la veille, le 16 avril, *trois heures après qu'il ait reçu mon message*, Jean-Baptiste Viot avait lancé son projet sur Facebook, alors qu'il savait donc que j'avais fait des relevés qu'il n'avait pas :

Facebook: J-b Viot Horloger  
16 avril 2019 15h54  
Pour le Rétablissement de l'horloge de Notre-Dame de Paris.

Nous avons surement beaucoup de temps devant nous mais il faut y réfléchir dès maintenant.  
L'idée est de réunir les horlogers et autres bonnes volontés afin de trouver une solution pour reconstruire l'horloge aujourd'hui disparue.  
...

Je ne dis pas que je suis à l'origine du projet, et plusieurs personnes peuvent avoir eu la même idée indépendamment et presque simultanément, mais il y a quelque incongruité à lancer un projet unilatéralement lorsqu'on sait que d'autres ont été impliqués dans Notre-Dame avant, et a fortiori par quelqu'un qui n'a jamais examiné cette horloge...

Et en juin 2019, les journaux nous ont annoncé que Jean-Baptiste Viot avait « découvert » une horloge jumelle de celle de Notre-Dame à la Trinité. Sauf que... j'avais déjà examiné cette horloge un an plus tôt et fait le lien. Et d'autres avant moi le savaient certainement aussi, même si cela a été oublié.

En réalité, j'ai eu la chance de pouvoir examiner l'horloge de Notre-Dame en 2016, de faire des relevés et de prendre de nombreuses photographies. C'est sur cette base que j'ai modélisé le mécanisme. Je n'avais initialement pas prévu de le faire, mais pour diverses raisons j'ai pris un peu de mon temps pour y travailler à partir de février 2020. (Ce projet, soit dit en passant, est totalement indépendant du confinement de mars-mai 2020 dû au virus SARS-Cov-2.)

## La modélisation

Début 2020, j'ai donc réalisé une modélisation assez complète de l'horloge de Notre-Dame. Cette modélisation n'est pas totalement basée sur l'horloge elle-même, car je n'ai pas pu avoir toutes les dimensions de l'horloge. Elle a de ce fait été grandement paramétrée, ce qui fait d'elle une modélisation beaucoup plus générique que la plupart des modélisations d'horloges d'édifice. Il s'agit aussi d'une ébauche où un certain nombre

d'aspects restent à compléter. Tout d'abord, j'insiste sur le fait que les dimensions de cette modélisation ne respectent pas à 100% celles de l'horloge originale, mais elles sont néanmoins en principe cohérentes. Les nombres de dents sont normalement corrects, sauf peut-être pour les roues à rochet (l'erreur, si elle existe, ne devrait pas excéder deux dents). Des ajustements pourront être réalisés par la suite, notamment lors de l'examen de certaines horloges très similaires ou des restes de l'horloge de Notre-Dame.

Il est important de comprendre que la réalisation d'une copie numérique exacte d'une horloge est un objectif très réducteur. À la limite, c'est même une facilité de copier une horloge, il suffit de prendre des dimensions et de les reporter dans un logiciel quelconque. Cela prend du temps, mais ce n'est pas difficile, même s'il y a des milliers de pièces. C'est ce qui a été fait avec plusieurs horloges d'édifice. Ce qui est beaucoup plus difficile, mais aussi beaucoup plus intéressant et beaucoup plus utile, c'est de prendre du recul et de réaliser une sorte d'abstraction de l'horloge. Cette démarche d'abstraction permet aussi de mieux comprendre sa conception et les choix qu'ont pu avoir les constructeurs. Ce que j'ai fait ici, même si cela n'est pas totalement complet ou fidèle, est d'une certaine manière beaucoup plus général qu'une copie exacte et l'horloge de Notre-Dame doit alors être vue comme un cas particulier d'une famille de mécanismes dont ma construction est un exemple parmi d'autres.

Mais dans ma construction, je n'ai pas voulu aller plus loin que ce que j'ai fait, notamment pour des raisons de temps. Ce projet est en effet un projet bénévole auquel je ne peux consacrer qu'un temps limité. Je n'ai donc pas tout modélisé. Je n'ai par exemple pas modélisé les filetages et taraudages et divers autres détails. Certaines vis n'ont pas encore été intégrées, mais le seront peut-être dans une prochaine version. Les diamètres de certains trous ne me sont pas connus. Les textes figurant sur les cadrans et plaques n'ont pas été ajoutés. Il y a aussi des incertitudes pour la structure de certaines pièces comme les cylindres. Les câbles n'ont pas non plus été modélisés. Certains arbres de l'horloge ont un profil bombé mais ce profil n'a pas (encore) été reproduit dans la modélisation. Il en est de même pour de nombreux chanfreins ou anglages, y compris dans le châssis en bois. Aucun bouchonnage n'a été fait au niveau des pivots.

J'ai aussi fusionné certaines pièces, alors que ce sont en fait des éléments séparés. C'est par exemple le cas pour les segments en contact avec les chaperons des roues de compte qui sont en fait vissés par quatre vis sur les bras palpeurs. D'autres pièces ont été regroupées, essentiellement pour éviter qu'il y ait trop de pièces. Les rouleaux des roues premières des sonneries ont par exemple tous été rassemblés en un unique objet virtuel.

Malgré tous ces défauts, je crois que cette modélisation peut être utile à d'autres.

La modélisation complète est disponible sur le site suivant :

<https://github.com/roegeld/notredame>

Plus précisément, chaque pièce de l'horloge a été modélisée de manière indépendante et est fournie dans les formats STEP, IGES, OBJ et STL, donc deux formats très généraux et fidèles et deux formats triangulés. Les dimensions y sont toutes exprimées en mm. Chaque pièce a été nommée suivant une nomenclature simple (AA, AB, AC, etc.). Le détail des pièces est donné plus loin dans ce document. De plus, un fichier spécial « `positions.txt` » donne les translations à appliquer à toutes ces pièces pour les mettre aux bonnes places lors de l'assemblage. Par exemple, la ligne

$position(BA2) = (0.0, 700.0, 0.0)$  signifie que la pièce BA2 doit être traduite de 700 mm selon l'axe des Y. Toutes les pièces sont déjà orientées correctement et aucune rotation ne doit être appliquée, sauf par la suite pour une éventuelle animation.

L'assemblage complet est aussi fourni, mais c'est un assemblage statique, sans colorisation ou textures, sans même aucune structuration hiérarchique. Le but de cette modélisation est de permettre à quiconque de comprendre la structure et le fonctionnement de l'horloge, de s'approprier la modélisation, de l'améliorer, de faire des animations, etc. Les différents fichiers fournis peuvent être inclus dans des logiciels professionnels comme AutoCAD Inventor, 3Dmax, Rhino, Catia, Tinkercad, etc., mais aussi dans des logiciels libres comme Blender (cf. petit exemple fourni), FreeCAD, BRL-CAD, etc., et toute personne familière de la CAO pourra faire l'assemblage des pièces et animer l'horloge. Dans la plupart des cas, l'assemblage des pièces doit pouvoir se faire en quelques heures au plus. Il est même possible de se passer de tels logiciels de CAO et de programmer le chargement des fichiers fournis en employant une bibliothèque graphique. Chacun pourra, s'il le souhaite, créer une structuration arborescente des pièces dans son logiciel préféré. Les roues sont toutes placées en engrènement et il suffit donc de les faire tourner de manière adéquate pour les animer. Pour les parties flexibles comme les ressorts, je laisse à chaque expert de son logiciel le soin de rendre ces pièces flexibles tout en maintenant les contacts.

Il y a cependant une *licence d'utilisation*, ce qui est normal pour éviter qu'un travail ne soit purement et simplement pillé. Cette licence est très simple. Je demande tout d'abord à ce qu'aucune partie de mon travail ne soit incorporée dans une œuvre commerciale. D'autre part, je demande à ce que toute utilisation de mon travail mentionne son origine.

La nomenclature employée dans cette modélisation peut facilement être utilisée pour le repérage des éléments des décombres. Il suffirait de mettre une étiquette sur chaque pièce et ensuite d'organiser leur analyse par des experts en métallurgie. En fait, la première application de ma modélisation devrait sans doute être celle de l'exploitation des restes de l'ancienne horloge, et non pas la construction d'une réplique. Je suis bien sûr disposé à participer à ce travail d'identification.

Je tiens encore à insister sur le fait que je ne fournis aucune animation. Mon travail se limite à cette modélisation, mais je retoucherai sans doute certaines pièces et mettrai en ligne de nouvelles versions de la modélisation si nécessaire.

Je suis aussi disposé à mettre en ligne toute contribution et j'invite toute personne intéressée à rendre accessibles ses modélisations dans des formats ouverts, notamment des formats vectoriels comme STEP et IGES (donc pas uniquement des formats OBJ ou STL, par exemple). Certaines personnes ont le projet de créer des bibliothèques horlogères, mais sans rendre les fichiers vectoriels accessibles, et uniquement dans un but de domination économique. Cela ne présente aucun intérêt pour le patrimoine et lui est même nuisible.

Mes photographies de l'horloge de Notre-Dame ne seront pas fournies à ce stade, mais pourront être fournies à ceux ou celles qui seront choisis par le Gouvernement pour reconstruire l'horloge. J'estime en effet que j'ai le devoir de rendre accessibles mes relevés et de les faire bénéficier à l'effort de reconstruction de la cathédrale. Ces photographies pourront aussi servir à des études scientifiques sur les restes de l'horloge. Toutefois, je ne souhaite pas que mes relevés servent simplement aux intérêts personnels

d'horlogers ou de collectionneurs.

## Le projet de reconstruction de Jean-Baptiste Viot

Il est à noter qu'il y a un groupe coordonné par Jean-Baptiste Viot et qui a pour but de reconstruire l'horloge, en prenant notamment comme base l'horloge de l'église de la Trinité à Paris. Je ne suis pas du tout associé à ce groupe, mais j'attire l'attention des personnes intéressées sur le fait qu'il y a d'importantes différences entre les horloges de la Trinité et de Notre-Dame. Non seulement les dimensions ne sont pas tout-à-fait les mêmes, mais les caractéristiques techniques diffèrent aussi. De plus des roues ont été supprimées à la Trinité et certains nombres de dents ne sont pas les mêmes. Il est donc hasardeux de vouloir reconstituer l'horloge de Notre-Dame à partir de celle de la Trinité (ou d'une quelconque autre horloge Collin, d'ailleurs).

Mais le projet de Jean-Baptiste Viot m'amène aussi à insister sur le fait qu'une reconstruction ne peut en fait aucunement s'envisager par des horlogers seuls. Elle doit impérativement impliquer les chercheurs (et pas simplement les chercheurs en matériaux ou les historiens), et aussi prendre en compte les besoins de ces chercheurs, presque toujours ignorés par les conservateurs, restaurateurs et autres acteurs du patrimoine. De plus, les chercheurs, historiens et autres scientifiques doivent être mis à égalité avec les horlogers, et non être mis sous leur direction, comme si seuls horlogers et restaurateurs dirigeaient le patrimoine.

En fait, dans mon travail, j'ai finalement aussi voulu montrer qu'il n'était pas nécessaire d'être un horloger *en vogue*, ou d'avoir des diplômes en horlogerie, ou encore des distinctions en matière de patrimoine, pour étudier une horloge et la modéliser. Quiconque se lance dans une reconstruction 3D sérieuse se rend en effet inévitablement compte de l'importance des mathématiques, de la nécessité d'avoir des connaissances en cinématique (et dans le cas des mécanismes, notamment dans la difficile question des profils des dents), mais aussi de l'importance de la flexibilité des reconstructions, et donc de leur paramétrabilité. Toutes ces questions sont quasiment étrangères non seulement au milieu horloger, mais même aux compétences de la plupart des informaticiens ou de personnes familières de logiciels de CAO, si bien qu'en fait il n'est pas du tout suffisant d'être horloger, ni même d'être horloger et de s'adjoindre un informaticien, pour réaliser un bon travail de modélisation. Ceux qui le font croire, ou qui le croient, se trompent. La modélisation mécanique est difficile et est pratiquement un métier à part, qu'on n'improvise pas simplement en achetant un logiciel. Le travail que j'ai fait n'est donc pas parfait (je ne suis pas horloger), mais il se base sur un savoir-faire que les horlogers et informaticiens n'ont en général pas et il doit surtout permettre d'ouvrir le débat et d'éviter de le confiner à un petit groupe autoproclamé responsable de la reconstruction et travaillant à huis clos.

## Comparaisons avec d'autres modélisations

Ma modélisation ne reprend aucune autre modélisation d'horloge et n'emploie pas les mêmes outils que ceux qui ont été employés ailleurs. Elle n'utilise en particulier aucune bibliothèque d'engrenages. Chaque modélisation a ses imperfections, et la mienne

ne fait pas exception. Je mentionne en passant quelques modélisations de grandes horloges qui me viennent à l'esprit, sans que cette liste prétende à l'exhaustivité :

- Sébastien Lucchetti a réalisé pour François Simon-Fustier un certain nombre de modélisations, notamment de l'horloge horizontale décrite dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, de l'horloge Borrel du château de Vaux-le-Vicomte, de l'horloge de l'hôtel de ville de Cluses et de celles du palais de Mafra ; aucune de ces modélisations n'a été rendue publique, les fichiers vectoriels ne sont pas disponibles, tout au plus y a-t-il une version utilisant `Three.js` produite automatiquement à partir des fichiers sources de SolidWorks ; il est difficile de juger de la qualité de ces reconstructions, puisque l'on n'a pas accès aux pièces individuelles, aux plans, aux dimensions ; je signale en passant que les restaurations réalisées n'ont semble-t-il pas été suffisamment documentées et que plusieurs des affirmations publiques de M. Simon-Fustier sur l'histoire de ces horloges sont erronées ;
- Tristan Ledard a modélisé pour Jean-Paul Crabbe l'horloge Vérité d'Allonne (60), en produisant de beaux rendus, mais les fichiers sources ne sont pas non plus disponibles ; de plus, certains rouages ont fait l'objet d'approximations assez grossières ; j'ignore quel logiciel a été utilisé ;
- Michel Dumain a réalisé plusieurs modélisations d'horloges comtoises, notamment de l'horloge de Septmoncel à l'aide du logiciel Rhino 6 ; les fichiers sources ne semblent pas accessibles ;
- Patrick Favrichon, du lycée d'altitude de Briançon, a utilisé SolidWorks pour modéliser une horloge Francis Paget de 1911 ; sauf erreur de ma part, les fichiers sources ne semblent pas disponibles ;
- Stéphane Potier (entreprise Inventive Studio) a réalisé une modélisation d'une grande partie des rouages de l'horloge astronomique de Strasbourg en 2017, à l'aide du logiciel 3DSmax ; une vidéo commerciale a été produite, mais elle ne laisse guère entrevoir les détails ; il semble que la modélisation soit très approximative (elle n'a pas été encadrée scientifiquement) ; par ailleurs, les fichiers sources ne sont pas disponibles pour être examinés ou réutilisés ; ils n'ont même pas été fournis à la fabrique de la cathédrale de Strasbourg qui a passé commande de cette modélisation ;
- en Autriche et vers 2015, Michael Neureiter a supervisé la modélisation d'une horloge Hörz à l'aide du logiciel MicroStation de Bentley Systems ; aucun fichier source ou animation ne semblent avoir été rendus publics.

Outre le fait que pratiquement aucun auteur de modélisations n'a diffusé de fichiers qui soient suffisamment ouverts et complets (les fichiers OBJ, STL et tous les formats propriétaires ne sont pas acceptables de ce point de vue, et si je les fournis, c'est en complément des formats STEP et IGES qui sont des reproductions exactes des pièces que j'ai construites), ma modélisation se distingue de toutes les autres par le fait qu'elle n'a que très partiellement pu se baser sur les dimensions de l'horloge originale. J'ai certes quelques dimensions et de nombreuses photographies, mais pour certains détails je n'ai pu me baser que sur mes photographies. Il y a donc une difficulté supplémentaire que n'ont pas eue tous ceux qui ont réalisé les modélisations que je viens de mentionner.

Mais c'est aussi un avantage qui oblige à analyser davantage l'assemblage pour le rendre plus flexible.

Par ailleurs, aucune des modélisations que je viens de mentionner n'a fait l'objet de publications scientifiques dans des revues spécialisées comme *Horological Journal* ou *Antiquarian Horology*, alors que l'on pourrait s'attendre à ce que certaines d'entre elles — je pense notamment à celle de Strasbourg — soient l'occasion de développer la connaissance scientifique, et pas uniquement les intérêts économiques de leurs auteurs.

## Importance de l'accessibilité des modélisations

La non-accessibilité des sources des modélisations sert en fait aux constructeurs et un certain nombre des personnes que je viens de mentionner sont beaucoup plus intéressées par le développement économique de leur activité que par la conservation du patrimoine. Ce problème est en fait beaucoup plus général que celui de la modélisation et concerne toutes les interventions sur le patrimoine qui sont presque toujours insuffisamment documentées. Les horlogers sont quelquefois amenés à rédiger des rapports de restauration et il est extrêmement rare que ces rapports décrivent les restaurations, et encore moins les œuvres, de manière adéquate et professionnelle. Pour donner deux exemples, les horlogers Jean-Baptiste Viot et François Simon-Fustier ont récemment restauré les horloges du Panthéon et de l'hôtel de ville de Cluses, et dans les deux cas les rapports de restauration (qui sont publics) ne décrivent pas en détail les horloges en question. Ceci est en contradiction totale avec les objectifs de la conservation du patrimoine qui incluent le développement de la connaissance et la mise à disposition de cette connaissance au public.

Je crois donc que tous ceux qui modélisent des objets patrimoniaux devraient rendre accessibles au moins les mêmes éléments que ceux que je rends accessibles pour l'horloge de Notre-Dame. Certes, je ne rends pas mes plans accessibles, mais c'est parce que ce sont des brouillons sur papier (je n'ai aucun plan informatique), et je ne rends pas d'animation accessible parce que je n'en ai pas produit. Mais tous ceux qui le souhaitent peuvent produire des plans ou des animations à partir de mes fichiers. Certaines de ces pièces peuvent être modifiées ou remplacées par de meilleures modélisations si nécessaire, car la reconstruction est totalement modulaire. Les pièces que j'ai construites peuvent être examinées en détail et sous tous les angles. On ne peut pas en dire autant des modélisations citées plus haut.

Il est à mon avis symptomatique de voir que peu de personnes semblent comprendre la nécessité de rendre les modélisations accessibles à tous et qu'il n'est pas suffisant de créer simplement des vidéos dont l'intérêt pédagogique ou scientifique, et l'accessibilité sont très faibles. Il est aussi essentiel que ceux qui réalisent des modélisations, et notamment les horlogers, aient une attitude responsable et acceptent de communiquer et répondre aux questions, quelles qu'elles soient, et d'où qu'elles proviennent. L'attitude hautaine et arrogante de certains horlogers et restaurateurs est de ce point de vue totalement inacceptable, même si heureusement beaucoup d'horlogers beaucoup plus humbles ne cherchent pas la gloire mais simplement le travail bien fait. L'exposition médiatique excessive de certains horlogers semble en effet servir davantage à leurs intérêts personnels qu'au patrimoine, ce qui est aussi inacceptable. Enfin, ce qui est

inacceptable, c'est que certains horlogers et restaurateurs fassent croire aux conservateurs du patrimoine, et croient peut-être eux-mêmes, qu'ils ont toutes les compétences en matière d'horlogerie ou de modélisation. À titre d'exemple, Jean-Baptiste Viot, actuellement très en vogue, a dernièrement publié une contribution dans un catalogue d'exposition dans lequel des affirmations fausses sur la théorie des engrenages sont propagées, car recopiées de sources non vérifiées. Le même horloger a récemment tenu publiquement des propos inexacts sur les cames d'équation du temps dans le contexte de l'horloge Lepaute de Fontainebleau (pour en savoir plus, je renvoie les personnes intéressées à mon chapitre sur l'horloge Lepaute des Invalides dans le livre de la collection « La grâce d'une cathédrale »). Le devoir du chercheur que je suis est justement de ne pas laisser passer cela, et d'apporter un recul critique et méthodologique, y compris dans des domaines qui ne semblent pas être les miens. La vérité, c'est que les horlogers n'ont pas toutes les connaissances sur la totalité du domaine de l'horlogerie. Personne n'a toutes les connaissances d'un domaine, pas plus moi qu'un autre, mais chacun est susceptible d'y contribuer. Il est naïf et présomptueux de croire que parce que l'on a fait telle école d'horlogerie ou que l'on a tel diplôme que l'on est supérieur à d'autres ou que l'on puisse avoir le mot de la fin sur toutes les questions liées de près ou de loin à l'horlogerie. C'est pourtant ce que certains horlogers laissent penser, et sans doute pensent eux-mêmes. Tout cela est évidemment vrai de tous les domaines, mais curieusement les conservateurs, journalistes et le public semblent ici être tombés dans le piège de cette simplification abusive. Il faut maintenant qu'ils en tirent les conséquences.

## **La parole est aux horlogers, restaurateurs, conservateurs, historiens et autres chercheurs**

Mon travail de modélisation est maintenant pratiquement achevé. C'est désormais à d'autres de prendre la suite et d'aller plus loin. Parmi les actions à entreprendre, il est possible :

- d'animer une discussion publique (pas sur un forum privé) ; il serait utile d'avoir un forum dédié, qui permette à tous de s'exprimer, qui ne soit pas fermé (comme un groupe facebook restreint) et qui permette d'effectuer des recherches (ce qui exclue dont les discussions sur facebook qui ne permettent pas d'archivage et de recherches efficaces, facebook étant essentiellement de l'« instantané ») ;
- de corriger ma modélisation ou d'en réaliser une autre ; il faut noter que l'on peut très bien envisager une bifurcation avec d'une part l'évolution vers une modélisation générique ne respectant pas exactement les dimensions de l'horloge de Notre-Dame, et d'autre part la recherche d'une modélisation aussi exacte que possible de l'horloge de Notre-Dame ; l'un n'exclue pas l'autre ;
- d'utiliser la nomenclature que j'ai employée comme base de discussion ; au lieu de parler dans le vague de telle ou telle pièce, il pourra être possible de faire référence précisément à l'une d'entre elles, de la discuter, de la critiquer, de l'améliorer, etc. ; ces discussions pourront utilement enrichir la réflexion sur l'horloge et aussi sur l'histoire de l'horlogerie ;



- de créer des plans pour chaque pièce ;
- de détailler les méthodes de fabrication historiques supposées des pièces ;
- d’adapter cette modélisation à d’autres horloges ;
- de travailler en *open-source* en produisant des documents et fichiers utilisables par tous et en maintenant une archive ouverte.

Si plusieurs modélisations sont créées, de manière indépendante ou basées sur la mienne, ces modélisations gagneront naturellement à être comparées et discutées finement, afin que chacun, y compris moi, puisse améliorer ce qu’il a fait. Cela ne peut se faire que si tous les fichiers sont accessibles à tous. Par exemple, si un horloger modélise l’horloge, il est important que tous puissent avoir accès à ses fichiers vectoriels, pièce par pièce et que la communication ne soit pas simplement limitée à deux personnes.

Mais on peut en fait aller beaucoup plus loin. La modélisation 3D a été vue à juste titre par certains comme un outil pédagogique. C’est souvent l’argument qui est avancé aux conservateurs et médiateurs pour mettre en place une telle solution sur un lieu patrimonial. L’un de ceux qui ont prôné cette approche est François Simon-Fustier, déjà cité et horloger de Lyon, qui l’a mise en œuvre au château de Vaux-le-Vicomte, à l’hôtel de ville de Cluses ou encore au palais de Mafra. Mais ce qui a été fait jusqu’à présent est loin d’être suffisant. D’une part, comme je l’ai dit, les fichiers sources n’ont jamais été rendus disponibles, ni par M. Simon-Fustier, ni par d’autres, et encore moins sous des formes non dégradées. Ainsi, M. Simon-Fustier a certes mis en ligne une modélisation de l’horloge de l’hôtel de ville de Cluses, mais cette mise en ligne n’utilise pas les fichiers originaux. Elle utilise des représentations triangulées, analogues aux fichiers OBJ ou STL.

Pour d’autres modélisations, le public n’a eu accès qu’à des vidéos et quelquefois uniquement sur les sites patrimoniaux eux-mêmes. À Strasbourg, par exemple, la modélisation de l’horloge astronomique de la cathédrale est très évasive et ne peut guère être examinée de près. Elle n’est même pas accessible à ceux qui sont directement impliqués dans l’horloge. L’entreprise ayant réalisé la modélisation, peut-être en partie par scan 3D, utilise néanmoins sa modélisation dans des démonstrations de réalité virtuelle.

Mais indépendamment de ces aspects techniques ou d’accessibilité, il importe d’aller plus loin au niveau de la pédagogie et de la communication des connaissances. Ce qui a été fait jusqu’à présent, y compris dans le cas de la réalité virtuelle que je viens de mentionner, est en fait essentiellement de la poudre aux yeux. Le contenu pédagogique est en réalité quasiment nul. Remarquons que la communication des connaissances ne doit pas être réduite, comme les médiateurs du patrimoine semblent souvent le croire, à une simplification. Il faut certes simplifier pour certains publics, mais il faut surtout pouvoir s’adresser à tous les publics et répondre à toutes leurs attentes. On ne peut pas forcément le faire avec un seul support, mais il faut alors envisager la communication selon plusieurs supports, et notamment la communication intégrale (et évidemment gratuite) des données scientifiques, des mesures, des photographies, et bien sûr des modélisations, afin de permettre à ceux qui le souhaitent d’utiliser pleinement le travail fait par d’autres avant eux. Aucune des modélisations réalisées par M. Simon-Fustier ou d’autres ne répondent à ces objectifs.

Par ailleurs, M. Simon-Fustier a eu le projet de réaliser une bibliothèque de méca-

nismes d'horlogerie qui pourrait servir à l'enseignement. Cet objectif est tout-à-fait louable, mais il ne pourra être pleinement efficace que s'il est accessible à tous et si tous peuvent communiquer dessus. Je ne pense pas que ce soit une bonne idée de réaliser une bibliothèque payante dont la plupart des horlogers n'ont pas besoin. J'encourage bien plutôt chaque concepteur, chaque horloger, à participer au projet dont je pose la première pierre, projet de mise à disposition de tous de mécanismes complets, qui peuvent ensuite être développés davantage et servir à la mise au point d'autres supports. La modélisation que j'ai faite de l'horloge de Notre-Dame ne doit en aucun cas représenter un point final, mais plutôt un point de départ pour d'autres afin de réaliser des vidéos, des supports pédagogiques, etc., aussi variés et utiles que possible. Cette approche ne serait guère envisageable avec des bibliothèques fermées uniquement accessibles à quelques personnes qui auraient payé le prix fort et auxquelles on interdirait une rediffusion. Il faut au contraire garantir un droit libre de rediffusion et de réutilisation, pour que le plus grand nombre de personnes accèdent à ces connaissances.

## **Une reconstruction est-elle nécessaire ?**

Le débat sur la reconstruction de la charpente et de la flèche de la cathédrale Notre-Dame se retrouve, dans une moindre mesure, avec l'horloge. Faut-il la reconstruire ? J'ai moi-même proposé une reconstruction immédiatement après l'incendie et d'autres ont fait de même. Mais comme pour la flèche ou la charpente, il y a eu ceux qui voulaient reconstruire à l'identique et ceux qui préféraient en profiter pour réaliser une nouvelle construction.

Ceux qui veulent réaliser une nouvelle horloge et ne souhaitent pas reconstruire l'ancienne sont, de manière évidente, des personnes peu respectueuses du patrimoine et de son histoire. Il y a dans le cas de l'horloge, tout comme dans le cas de la charpente, des individus qui souhaitent tirer un trait sur le passé et l'oublier, ne voir que le futur. Et le futur, c'est souvent un futur qu'ils imaginent à leur gloire. Mais le futur, c'est aussi la mémoire.

Après avoir beaucoup réfléchi et réalisé cette modélisation, je pense de plus en plus qu'il est inutile de reconstruire l'horloge détruite à l'identique, a fortiori pour la placer dans des combles où personne ne la verra jamais. Si quelqu'un veut la reconstruire et la cacher, pourquoi pas, mais je pense que c'est là aussi une manière de nier l'histoire. Et l'histoire, aujourd'hui, inclut l'incendie. Nous ne devons pas faire comme si l'incendie de Notre-Dame n'avait pas eu lieu et reconstruire à l'identique, ce serait une négation de l'histoire. La même problématique est présente dans nombre de restaurations où les restaurateurs s'efforcent de revenir à un état initial qu'ils ne connaissent pas toujours avec certitude, en balayant au passage les modifications apportées à une œuvre. Il y a de meilleures manières de restaurer que celles qui consistent à effacer l'histoire d'une œuvre.

Certains horlogers veulent donc reconstruire l'horloge de Notre-Dame (tout en étant souvent bien peu au fait de l'horlogerie d'édifice, d'ailleurs), mais il y a aujourd'hui des choses bien plus importantes à faire. Ce qu'il importe avant tout, c'est de développer une vraie réflexion sur la conservation du patrimoine, à savoir tout d'abord sur ce qu'est le patrimoine (et à qui il s'adresse), et sur ce que signifie conserver le patrimoine. Je

suis d'avis que conserver ne doit pas se limiter à garder en état ou restaurer une œuvre. Il y a bien plus à faire. En matière d'horloges d'édifice ou d'autres œuvres, ce qu'il est notamment essentiel de faire, c'est d'assurer la conservation physique en même temps que l'accessibilité pérenne. Ceci me rend très méfiant à l'égard des collectionneurs et autres amateurs qui ne cherchent souvent qu'à ajouter une horloge à leur collection et qui croient ainsi naïvement contribuer à la conservation du patrimoine, alors que bien souvent ils contribuent à sa dissémination et à l'effacement de la mémoire. La priorité, pour un amateur d'horloges d'édifice devrait être de faire en sorte que l'horloge reste où elle était, ou pas loin, et que tous puissent la voir ou l'examiner, même après la disparition de cet amateur.

Ce qu'il est aussi très important de faire, et peut-être même plus important que de conserver physiquement les œuvres, c'est de les documenter et ce travail de documentation est quasiment inexistant pour les horloges d'édifice, y compris celles qui ont été restaurées. Des rapports de restauration existent pour quelques une des horloges restaurées, mais les rapports que j'ai vus (par exemple pour le Panthéon et Cluses) sont tous très incomplets, sans parler du fait qu'ils ne sont pas facilement accessibles au public. Ces rapports ont souvent uniquement été réalisés pour des conservateurs, et ceux qui voudraient des détails techniques ou historiques restent sur leur faim, notamment parce que certains restaurateurs refusent de communiquer avec les chercheurs. C'est par exemple le cas à Cluses ou encore à Strasbourg. Enfin, il y a une communauté de chercheurs, il y a des historiens, des techniciens, et d'autres professions, qui gagneraient à être associés aux interventions sur le patrimoine horloger, et qui sont curieusement presque toujours ignorés ou tenus à l'écart. Ceci nuit à la conservation du patrimoine qui n'est pas que matérielle et cela produit dans certains cas des dommages irréparables dont les conservateurs et restaurateurs ne sont pas conscients.

Il y a aujourd'hui un véritable problème dans la gestion de ce type de patrimoine, que ce soit par les horlogers, les restaurateurs ou les conservateurs. Plusieurs des horlogers en vogue n'ont en effet pas une attitude suffisamment scientifique et confondent le travail avec des objets anciens et le travail d'historien. Ce sont deux choses bien différentes. Il ne suffit pas d'avoir un objet ancien entre les mains pour automatiquement devenir un historien. Le travail de l'historien ne se résume pas non plus à écrire des résumés de textes ou documents lus. Le comportement de certains horlogers, sous des prétextes de conservation de patrimoine quelquefois honnêtes, s'apparente en réalité plus à du journalisme qu'à de la recherche et cette attitude n'est pas aussi utile au patrimoine que ces horlogers le croient. Ainsi, beaucoup de données historiques et scientifiques sur des horloges patrimoniales (une notion qui ne peut, en passant, être définie par les horlogers seuls) ont été perdues par le fait même des horlogers qui ont travaillé seuls sans réfléchir aux besoins du patrimoine, aux besoins de la communauté et notamment aux besoins des chercheurs, et bien sûr sans communiquer avec eux ou sans communiquer suffisamment avec eux. La prise en compte des besoins de la recherche, qui n'est pas réduite aux besoins des horlogers, ne peut se concevoir qu'en travaillant avec les chercheurs en amont, et pas simplement en aval. Dans le cas des horloges du Panthéon et de la mairie de Cluses, par exemple, les rapports fournis par les horlogers sont comme je l'ai dit insuffisants, et par ailleurs les responsables du patrimoine eux-mêmes, que ce soient des conservateurs, des maires ou des conservateurs de musée, n'ont en fait que faiblement suivi les restaurations, ce qui n'est pas, je pense,

une attitude suffisamment sérieuse par rapport au patrimoine.

Je pense donc que la priorité pour ceux qui s'intéressent à l'horloge de Notre-Dame et à d'autres horloges d'édifice ou monumentales, c'est d'œuvrer pour développer ces questions : mieux conserver, notamment en prenant en compte l'histoire des objets (et donc ne pas restaurer n'importe comment en supprimant des éléments); mieux documenter, en rendant les documentations plus complètes et en les rendant accessibles à tous (il ne s'agit pas ici de faire des supports de médiation simplifiés); et collaborer avec le monde de la recherche et d'autres professions, pour échanger et prendre en compte les apports et les besoins de chacun. Rien de tout cela n'existe à ce jour et c'est certainement bien plus important que de reconstruire une horloge et la mettre à un endroit où elle ne sera vue de personne.

## **Modéliser d'autres horloges et mécanismes ?**

J'espère que ce travail aura donné envie à d'autres de modéliser à leur tour d'autres horloges ou mécanismes et de rendre ces modélisations accessibles à tous et cela gratuitement. Malheureusement, l'envie ne suffit pas toujours à mener un tel projet à bout.

Pour effectuer un tel travail de la manière la plus complète possible, il importe que les chercheurs puissent avoir un accès privilégié aux œuvres, afin que des relevés aussi précis que possible puissent être faits. Dans le cas des horloges d'édifice, une grande partie des mécanismes est accessible et peut être mesurée, photographiée, étudiée, etc., sans démontage, simplement par observation. C'est comme cela que j'ai procédé pour l'horloge de Notre-Dame et beaucoup d'autres. Mais il y a inévitablement aussi beaucoup de détails qui m'ont échappé, du moins temporairement. Les vis sont par exemple cachées et je ne peux pas connaître leurs dimensions exactes et certains éléments sont enfermés rendant impossible leur analyse complète de l'extérieur. La situation est encore pire dans le cadre des petites horloges ou montres, dont le mécanisme est peu ou pas accessible au plus grand nombre, bien qu'il soit tout aussi intéressant. C'est donc là que les chercheurs ont besoin des horlogers. Dans l'idéal, les conservateurs et restaurateurs devraient s'associer avec les chercheurs pour déterminer les besoins des chercheurs et travailler ensemble à l'étude des horloges, même si l'objectif n'est pas de réaliser un modèle 3D. Cette association devrait être envisagée hors de tout cadre financier. La gestion du patrimoine est actuellement handicapée par l'incapacité de beaucoup de responsables de penser le patrimoine en dehors d'un cadre de marchés. Beaucoup de conservateurs ne peuvent comprendre qu'une étude sérieuse puisse se faire de manière bénévole, et que ces études sont indispensables, même si une horloge n'est pas restaurée ou en dehors du cadre d'une exposition. Les personnes les plus compétentes pour faire des études ne sont pas nécessairement celles qui font monnayer leurs travaux, et d'autre part les recherches utiles, importantes ou prioritaires ne sont pas seulement celles envisagées par les conservateurs.

Dans la pratique, pourtant, la presque totalité des interventions sur le patrimoine se font sans l'implication de chercheurs et les restaurateurs, qui ne sont pas toujours horlogers, ne font que des relevés minimaux qui ne sont pas suffisants pour les besoins des chercheurs. Il suffit de penser à toutes les montres et pendules qui passent dans les

maines des horlogers sans qu'aucune documentation ne soit produite. Cette situation n'est pas satisfaisante et elle s'explique notamment par le fait que les horlogers et restaurateurs ne connaissent pas les besoins de la recherche, et d'autre part par une tradition corporatiste qui consiste à conserver des secrets, sans parler du fait que les artisans ont aussi des objectifs économiques et ne s'intéressent en fait pas toujours autant au patrimoine qu'ils le font croire.

Réaliser d'autres modélisations, ou simplement avancer dans l'étude de ce patrimoine, ne dépend donc pas uniquement des chercheurs. Cela dépend beaucoup des horlogers et conservateurs, et de leur compréhension et ouverture à la recherche, aujourd'hui souvent très limitée. J'encourage donc tous les conservateurs et restaurateurs à aller vers les chercheurs, non pas dans le cadre de marchés, mais simplement dans l'objectif de faire avancer la connaissance du patrimoine. Les chercheurs peuvent apporter quelque chose aux conservateurs et aux restaurateurs, mais l'inverse est aussi vrai.

## Qui suis-je ?

Je suis maître de conférences à l'Université de Lorraine, mais ce projet de modélisation est un projet *privé* qui n'engage en aucune manière mon employeur. Je le cite pour une raison très simple, parce que j'utilise des connaissances en rapport avec ma fonction. J'ai eu l'occasion de faire des travaux en 3D et aussi d'enseigner la conception 3D. L'indication de ma fonction est donc pertinente, bien qu'il s'agisse d'un travail ici non professionnel.

De même, si quelqu'un souhaite m'écrire, il peut le faire à mon adresse professionnelle : Denis Roegel, LORIA, BP 239, 54539 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, et ceci n'implique en aucune façon un engagement quelconque d'un employeur.

Je précise enfin que si le sujet des horloges d'édifice m'intéresse et que je le connais un peu, je ne suis aucunement « passionné » par les horloges (et donc cela m'intéresse assez peu d'en parler). Je souhaite simplement apporter une petite contribution à la connaissance et à la recherche scientifique, notamment au travers de ma formation.

# Notes techniques sur la modélisation

## Détail de la nomenclature

Je donne ici les grandes lignes de la nomenclature que j'ai employée. Dans la plupart des cas, chaque pièce correspond à un fichier individuel, mais il y a quelques exceptions comme l'ensemble des chevilles de la roue d'échappement ou les rouleaux de levée des marteaux. Cette nomenclature comporte aussi quelques anomalies, essentiellement dues au fait que les pièces n'ont pas toujours été construites dans l'ordre d'assemblage et je n'ai pas voulu les renommer pour éviter d'introduire des erreurs inutiles.

J'insiste enfin sur l'importance qu'il y a à ne pas utiliser de caractères spéciaux dans les noms de pièces et à bannir notamment les espaces et les noms trop longs qui nuisent à la portabilité des fichiers. Certaines règles de nommage peuvent fonctionner dans un environnement donné, mais si de mêmes fichiers doivent pouvoir être utilisés sur différentes plate-formes, ou subir des traitements automatiques, il est indispensable d'adopter des règles qui facilitent ce travail. Des tables de correspondance peuvent avantageusement remplacer des noms trop longs.

- AA, AB, ..., AI, sont des éléments du châssis en bois ; en général, si des pièces comportent des numéros, 1, 2, etc., c'est qu'elles sont identiques ou presque ; on pourra vérifier que les pièces sont identiques ou pas en comparant les fichiers STEP, IGES ou autres ; on notera aussi que pour le châssis les assemblages sont très sommaires et les parties qui se pénètrent sont en fait plus longues ; les chevilles de fixation n'ont pas été modélisées (pour l'instant) ;
- B : châssis en fonte (grandes barres horizontales, entretoises et vis)
  - BA1 et BA2 sont les grandes barres horizontales avant et arrière ;
  - BB sont les quatre entretoises à structures de pont ;
  - BC1a, BC2a, etc., sont les rondelles des grandes vis horizontales des châssis BA1 et BA2 ;
  - BC1b, BC2b, etc., sont les vis à tête à six pans des châssis BA1 et BA2 ;
  - BD1a, BD2a, etc., sont les rondelles des grandes vis fixant les entretoises BB sur le châssis en bois ;
  - BD1b, BD2b, etc., sont les vis à tête carrées (et à entailles pour l'instant non reproduites) fixant les entretoises BB sur le châssis en bois ;
- C... : tout ce qui est lié au châssis principal et aux deux platines du mouvement
  - CA1, CA2 : les grandes platines du rouage de mouvement ;
  - CB1, CB2 : les plaques sur lesquelles reposent CA1 et CA2 ;
  - CC : la plaque supérieure qui relie CA1 et CA2 ; j'ai supposé que CC était fixée par des vis à CA1 et CA2, mais cela reste à vérifier ;
  - CD1, CD2, CD3, CD4 : les paliers des arbres des roues secondes des sonneries ;
  - CE1, CE2 : les supports des paliers des arbres des bras palpeurs ;
  - CF1, CF2 : les paliers avant des arbres de remontage des sonneries ;
  - CG1, CG2, CG3, CG4 : les paliers des arbres des roues premières des sonneries ;
  - CH1, CH2, CH3, CH4 : les paliers des arbres des volants des sonneries ;
  - CI1, CI2 : les paliers avant des bras palpeurs ;
  - CJ1 et CJ2 : les paliers des levées de marteaux ;

- CJ1a, CJ1b, CJ2a, CJ2b : les rondelles et vis de fixation des paliers CJ1 et CJ2;
- CK1 et CK2 : les paliers arrières des pignons de remontage des sonneries;
- CK1a, CK1b, CK2a, CK2b : les rondelles et vis de fixation des paliers CK1 et CK2;
- CL : le palier arrière de l'arbre de la roue d'échappement;
- CM, CMa : le palier avant de l'arbre de la roue d'échappement (et support du palier du chariot mobile);
- CN, CNa : le palier avant du chariot mobile (et support du palier du chariot mobile);
- CO : le petit palier du volant du remontoir d'égalité;
- CP : suspension du pendule;
- CQ : support de la crapaudine de l'arbre de transmission vertical;
- CR : la grande plaque à l'avant de l'horloge;
- CS : la petite plaque au-dessus du volant du rouage de mouvement;
- D : axe principal du rouage de mouvement
  - DA : l'arbre de la roue de remontage du mouvement;
  - DB : la roue première du mouvement;
  - DC : la roue à rochet de continuité de marche;
  - DE : le cylindre de mouvement, avec sa roue à rochet et sa roue de remontage (structure interne hypothétique);
  - DF, DG : manchons;
  - DH : le ressort spiral de la continuité de marche, liant DB à DC;
  - DIa et DIb : les cliquets de la roue à rochet;
  - DJa et DJb : les ressorts des cliquets de la roue à rochet;
- E : axes principaux des rouages de sonnerie
  - EA1 et EA2 : arbres des cylindres des sonneries;
  - EB1 et EB2 : roues premières des sonneries;
  - EB1a et EB2a : tenons (vis) portant les rouleaux;
  - EB1b et EB2b : rouleaux;
  - EC1 et EC2 : manchons;
  - ED1 et ED2 : manchons;
  - EE1 et EE2 : cylindres des sonneries, avec les roues à rochet et les roues de remontage (structure interne hypothétique);
  - EF1 et EF2 : pignons des roues de compte;
  - EG1a, EG1b, EG2a, EG2b : les cliquets des roues à rochet;
  - EH1a, EH1b, EH2a, EH2b : les ressorts des cliquets des roues à rochet;
- F : axes des roues secondes des sonneries
  - FA1 et FA2 : arbres des roues secondes des sonneries;
  - FB1 et FB2 : roues secondes des sonneries;
  - FC1 et FC2 : pignons lanternes des roues secondes des sonneries;
  - FD1 et FD2 : cames à trois encoches des arbres des roues secondes;
  - FE1 et FE2 : manchons sur les arbres des roues secondes;
- G : axes des volants
  - GA1 et GA2 : arbres des bras d'arrêt;
  - GB1 et GB2 : pignons lanternes des bras d'arrêt;
  - GC1 et GC2 : bras d'arrêts des sonneries;

- GD1 et GD2 : manchons des bras d'arrêt;
- GE1 et GE2 : manchons derrière les volants des sonneries;
- GF1 et GF2 : supports pour fixation des volants;
- GG1 et GG2 : roues à rochet des volants;
- GH : les quatre volants (pales);
- GI : rondelles à deux encoches des volants des sonneries;
- GI1a et GI2a : les cliquets entrant dans les encoches de GI1 et GI2;
- GJ : rondelles devant les roues à rochet des volants des sonneries;
- GK : cliquets des roues à rochet des volants des sonneries;
- GL : ressorts des roues à rochet des volants des sonneries;
- H : arbres de remontage des sonneries
  - HA1 et HA2 : arbres de remontage des sonneries;
  - HB1 et HB2 : pignons de remontage des sonneries;
  - HC1 et HC2 : manchons situés devant les pignons de remontage;
- I : arbres des roues de compte
  - IB1 et IB2 : les roues de compte;
  - IB1a et IB2a : rondelles séparant les roues de compte de leur chaperon;
  - IC1 et IC2 : les chaperons des roues de compte;
  - IC2a : l'ensemble des chevilles semi-cylindriques du chaperon de la roue de compte des quarts;
  - ID1 et ID2 : les manchons à l'avant des roues de compte;
  - IE1 et IE2 : les tenons des roues de compte;
  - IE1a et IE2a : les écrous à l'arrière des tenons des roues de compte;
  - IF1 et IF2 : rondelles à l'avant des tenons des roues de compte;
- J : arbres des bras palpeurs
  - JA1 et JA2 : les arbres des bras palpeurs;
  - JB1 et JB2 : les manchons des bras palpeurs;
  - JC : le manchon à l'arrière de l'arbre JA2;
- K : arbres supérieurs des levées (voir Y pour l'arbre inférieur)
  - KA1, KA2 : les arbres des levées de marteaux supérieurs;
  - KB1 et KB2 : rondelles derrière les arbres KA1 et KA2;
  - KC1 et KC2 : écrous derrière les arbres KA1a et KA2a;
  - KD1 et KD2 : les levées supérieures à l'avant;
  - KE1 et KE2 : les levées supérieures à l'arrière;
  - KF1, KF2, KG1, KG2, KH1, KH2 : les manchons des levées supérieures;
- L : arbre horaire du rouage de mouvement
  - LA : l'arbre horaire du rouage de mouvement;
  - LB : pignon sur l'arbre horaire;
  - LC1 et LC2 : les deux grandes roues coniques de transmission vers les cadrans extérieurs;
  - LD1 et LD2 : les deux petites roues coniques de transmission vers le cadran de contrôle;
  - LE : la came de déclenchement de la sonnerie des quarts;
  - LF : disque portant l'encliquetage LG;
  - LG : encliquetage (solidaire de LE);
  - LH : manchon liant LB à LF;



- LI : manchon fixé à l'avant de la roue conique LC1;
- LJ : manchon fixé au-dessus de la roue conique LC2;
- M : arbre de remontage arrière du mouvement
  - MA : le second arbre de remontage du mouvement;
  - MB : le pignon lanterne de remontage du mouvement;
- N : arbre de la détente des quarts et du cliquet de continuité de marche
  - NA : l'arbre de la détente des quarts et du cliquet de continuité de marche;
  - NB : manchon de la détente des quarts;
  - NC : le cliquet de la continuité de marche;
  - ND : manchon du cliquet NC;
- O : arbre de la roue seconde
  - OA : arbre de la roue seconde;
  - OB : le pignon de la roue seconde du mouvement;
  - OC : la roue seconde du mouvement;
  - OD : manchon fixé sur la roue OC;
- P : arbre du bras d'arrêt du remontoir d'égalité
  - PA : arbre de la roue troisième du mouvement;
  - PB : le pignon de la roue troisième du mouvement;
  - PC : la roue troisième du mouvement;
  - PD : le bras d'arrêt du remontoir d'égalité;
  - PE : la came à deux spirales qui servait sans doute pour des déclenchements électriques;
  - PF : manchon fixé au bras d'arrêt du remontoir d'égalité;
  - PG : manchon fixé sur la roue PC;
  - PH : manchon fixé derrière le bras PD;
- Q : arbre du volant du remontoir d'égalité
  - QA : arbre du volant;
  - QB : le pignon du volant;
  - QC : le support des pales du volant;
  - QDa et QDb : les pales du volant;
  - QE : la roue à rochet du volant;
  - QF : le manchon derrière le support des pales;
  - QG : cliquet de la roue à rochet;
  - QH : ressort du cliquet de la roue à rochet;
- R : arbre de la roue d'échappement
  - RA : arbre de la roue d'échappement;
  - RB : la roue d'échappement;
  - RBa : les chevilles de la roue d'échappement;
- S : arbre satellite
  - SA : arbre des roues satellites;
  - SB : pignon satellite;
  - SC : roue satellite;
  - SD : manchon fixé derrière la roue SC;
  - SE : manchon (supposé) devant la roue SC;
- T : détentes et bras palpeurs
  - TH : détente des heures située à l'avant (liaison entre quarts et heures);

- TH : détente ;
- THa : tenon de la détente ;
- THb : manchon sur le tenon de la détente ;
- THc : écrou (supposé) à l'arrière du tenon THa ;
- THd : rondelle à l'extrémité avant du tenon ;
- TP1, TP2 : bras palpeurs des heures et quarts ;
- TP1a, TP2a : les galets (manchons) qui appuient sur les roues à trois encoches ;
- TP1b, TP2b : les petites rondelles qui bloquent les manchons des galets ;
- TQ et TQa : la détente des quarts (en deux morceaux) ;
- U : éléments de la transmission vers le cadran supérieur
- V : pendule (suspension, tige, lentille et molette)
- W : ancre et fourchette
  - WA : arbre de l'ancre et de la fourchette ;
  - WB : fourchette et curseur ;
  - WC : ancre ;
- X : bascule du remontoir d'égalité
  - XA : arbre du chariot mobile (bascule) du remontoir d'égalité ;
  - XB, XC : chariot mobile (bascule) du remontoir d'égalité ;
  - XD : élément du chariot portant la rainure du fil du poids XE ;
  - XE : poids XE entraînant la bascule vers le bas ;
  - XF, XFa : contrepoids coulissant et sa vis de fixation ;
  - XG : fil métallique portant XE ;
  - XH : butée pour le bras d'arrêt ;
  - XI : manchon fixé sur XB ;
- Y : arbre inférieur des levées des quarts
  - YA : l'arbre des levées ;
  - YB : levée de devant ;
  - YC : levée arrière ;
  - YD, YE, YF : les manchons des levées inférieures des quarts ;
- Z : le sol

## Notes sur la modélisation de certaines pièces

Outre les remarques générales faites plus haut, je reviens encore sur deux caractéristiques de ma modélisation, à savoir l'incertitude qui affecte certaines pièces et les simplifications intentionnelles.

### Incertitudes

Soit du fait de l'examen uniquement extérieur de l'horloge, soit du fait de certains angles morts dans les photographies, il y a des incertitudes dans la modélisation de certaines pièces. Il peut ainsi y avoir des erreurs au niveau de certaines pièces, voire des oublis, certaines parties peuvent manquer ou encore être mal assemblées. Ces problèmes pourront être résolus par l'examen plus approfondi et critique de certaines horloges comme celle de la Trinité, mais aussi des restes de l'horloge de Notre-Dame.

## Pièces volontairement simplifiées

Par ailleurs, certaines pièces ont délibérément été simplifiées, et il est possible d'envisager une modélisation plus fine de ces pièces dans le futur. Dans l'un ou l'autre cas, les simplifications s'expliquent par le fait qu'il est beaucoup plus facile de créer certaines pièces mécaniquement qu'avec des logiciels, a fortiori lorsque les formes sont complexes ou lorsque les pièces sont des pièces de fonderie et que la modélisation se fait sans scan 3D. Il serait faux de croire que modéliser une horloge sur ordinateur est nécessairement plus facile que de construire l'horloge physiquement. C'est un problème différent, et bien qu'il y ait un très grand nombre de recoupements entre les deux démarches, il y a aussi des aspects qui sont propres d'un côté à la mécanique (par exemple les techniques de fonderie ou l'utilisation de machines-outils) et d'un autre côté à la modélisation (par exemple les questions de paramétrage qui sont totalement étrangères aux procédures de développement manuelles).

Pour citer quelques exemples de simplifications :

- les pignons des bras d'arrêt sont en réalité plus complexes que modélisés ici et il y a notamment des plaques semi-circulaires vissées à l'avant et peut-être aussi à l'arrière ; cela semble aussi s'appliquer aux pignons des roues secondes des sonneries ;
- les paliers des levées de marteaux (CJ1 et CJ2) ont une forme complexe que j'ai un peu simplifiée ;
- les paliers des arbres des roues secondes des sonneries ont des ajourages qui n'ont pas totalement été reproduits ; il en est de même des entretoises (BB) ;
- les cylindres ont une structure interne que je ne connais pas et celle modélisée ici est donc hypothétique (DE, EE1, EE2) ; il faut noter que les cylindres que j'ai réalisés comportent des éléments non visibles, mais que l'on peut découvrir en les découpant ;
- diverses rondelles ou manchons (comme DF, DG) sont partiellement hypothétiques ;
- les emboîtements des éléments du châssis en bois ont été fortement simplifiés avec des tenons et mortaises carrés et aucune goupille ;
- les pièces rapportées dans les détentes et palpeurs ont été fusionnées avec les détentes et bras palpeurs, en attendant de faire éventuellement mieux ;
- de même, pour des raisons pratiques, d'autres pièces ont été provisoirement fusionnées mais seront séparées par la suite ; c'est par exemple le cas de la suspension du pendule (Va) qui est composée d'au moins onze éléments, et peut-être même quinze, et que j'ai construite en un seul morceau et sans rivets ;
- la structure des pignons de remontage des sonneries est incertaine et je les ai supposées d'une seule pièce ;
- la structure inférieure de la tige du pendule, notamment à l'intérieur de la lentille, est incertaine et j'ai supposé que la compensation employait une barre de zinc (à l'intérieur) et deux barres d'acier (à l'extérieur), mais cela reste à vérifier ; dans ce dispositif, la lentille est fixée à la barre de zinc et les trois barres sont reliées ensemble au niveau de la molette inférieure ; mais plutôt que de faire une reconstruction hypothétique, j'ai réalisé une construction provisoire que je *sais*

être fausse ; la molette est tout-à-fait simpliste et les barres extérieures de la tige ne jouent aucun rôle dans ma construction ; j'espère préciser cette structure par la suite ;

- les extrémités des arbres n'ont pas (encore) été arrondies ;
- le fil XG du poids du remontoir d'égalité n'est actuellement pas fixé ;
- la pièce XH est en réalité légèrement plus complexe que je ne l'ai représentée ;
- la transmission vers le cadran supérieur, et notamment la minuterie, comportent certainement de petites inexactitudes, en particulier au niveau des liaisons entre les roues et les arbres ; là aussi j'espère résoudre ces problèmes par la suite ;
- certaines vis n'ont pas encore la bonne longueur, mais cela sera corrigé dans une version future ;
- en général, je n'ai pas mis de jeu dans les arbres et ces jeux devront être ajoutés par ceux qui souhaitent reconstruire l'horloge (ou l'imprimer en 3D) ;
- les engrènements des roues dentées ne sont pas tous parfaits, mais pourront être améliorés par la suite, notamment pour certains pignons du rouage de mouvement ;
- en général, je n'ai pas non plus construit de goupilles et certains trous pour goupilles peuvent manquer (mais seront peut-être ajoutés dans le futur) ;
- dans quelques rares cas, des lacunes ont été laissées apparentes, car je n'ai pas de photographie de détail de ces parties ; j'ai préféré ne rien mettre, plutôt que d'imaginer une pièce, même si mon approche n'a pas été cohérente dans l'ensemble de l'horloge ; un exemple est le cas de la grande roue conique d'axe vertical où la crapaudine n'a pas été modélisée ;
- seules deux plaques ont été placées sur l'horloge, à savoir CR (grande plaque à l'avant) et CS (petite plaque au-dessus du volant du rouage de mouvement) ; aucune inscription n'y a été inscrite et les plaques n'ont (pour l'instant) pas été munies de chanfreins ;
- certaines pièces ne me donnent pas totalement satisfaction, mais j'ai décidé de les laisser telles quelles pour l'instant ; c'est par exemple le cas des ressorts maintenant les cliquets des roues à rochet ; il serait facile de les améliorer dans le futur ;
- certaines pièces ont une forme acceptable mais portent des traces de leur conception informatique, traces qui dans l'un ou l'autre cas pourraient être effacées sans trop de difficultés ;
- etc.

## Mises à jour et compléments

Il est probable que je serai amené à apporter des corrections, des ajustements ou des compléments à ma modélisation et ces mises à jour seront disponibles au même endroit que le premier ensemble de fichiers. Je pense en particulier améliorer certaines pièces, décomposer certaines pièces actuellement fusionnées (par exemple la suspension du pendule), ou ajouter quelques détails en fonction des retours que j'aurai. Je mettrai peut-être aussi tous les modèles 3D sur <https://www.thingiverse.com> (ou ailleurs), lorsque certains détails auront été précisés, afin que tous puissent facilement imprimer des éléments de l'horloge.