

Lanternes harmoniques : une étude de cas en recherche-création

Harmonic Lanterns: A Case Study in Research-Creation

Nicolas Reeves¹, David St-Onge², Pierre-Yves Brèches³, Guillaume Crédooz⁴, Yanjun Cao⁵

¹ NXI GESTATIO Design Lab, Université du Québec à Montréal, Canada, reeves.nicolas@uqam.ca

² Laboratoire INIT Robots, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, david.st-onge@etsmtl.net

³ Développeur logiciel, Google, Toronto, Canada, pierreyvesbreches74@gmail.com

⁴ Architecte, BitsToAtoms & Post-Industrial Crafts, Beyrouth, Liban et St-Étienne, France,
guillaume.credoz@postindustrialcrafts.com

⁵ Huzhou Institute, Zhejiang University, Hangzhou, Chine, yanjunhi@zju.edu.cn

RÉSUMÉ. Au tournant des années 2000, notre laboratoire a été invité à participer à la fondation de l'institut Hexagram, un organisme montréalais dédié à la recherche-création en arts et technologies médiatiques. Cela signifiait par le fait même que notre travail avait été déjà identifié comme relevant de ce domaine dont la définition, alors très incertaine, faisait l'objet de discussions actives. Bien qu'ils se précisent progressivement depuis un quart de siècle, ses contours restent encore relativement flous, notamment quant à son statut par rapport à d'autres champs artistiques tels que l'art/science ou les arts numériques. Or, comme c'est le cas pour de nombreux créateurs-rechercheurs, l'analyse rétrospective des projets conduits par notre laboratoire révèle plusieurs éléments susceptibles de contribuer à clarifier les objectifs, les méthodologies et le cadre de référence de la recherche-création. Il en va ainsi du programme d'exploration artistique *Point d'Origine*, objet de nos travaux depuis plusieurs années. Son élément central est un petit objet baptisé *Lanterne Harmonique*, dont la conception et la réalisation se sont déroulés au confluent de la recherche scientifique et historique, du développement technologique et de l'expérimentation créative. Le présent article décrit l'origine et les enjeux du programme et résume les étapes qui ont conduit au design final de la Lanterne.

ABSTRACT. At the turn of the 2000s, our laboratory was invited to participate in the founding of the Hexagram Institute, a Montreal organization dedicated to research-creation in media arts and technologies. This meant that our work had already been identified as falling within this field, the definition of which, at the time very uncertain, was the subject of active discussions. Although they have gradually become clearer over the past quarter of a century, its limits remain relatively vague, particularly with regard to its status in relation to other artistic fields such as art/science or digital arts. However, as is the case for many creators-researchers, the retrospective analysis of the projects conducted by our laboratory reveals several elements likely to contribute to clarifying the objectives, methodologies, and frame of reference of research-creation. This is the case for the artistic exploration program *Point d'Origine*, the subject of our work for several years. Its central element is a small object called the *Harmonic Lantern*, whose design and implementation took place at the confluence of scientific and historical research, technological development, and creative experimentation. This article describes the origins and challenges of the program and summarizes the steps that led to the Lantern's final design.

MOTS-CLÉS. Recherche-création, architecture, musique spectrale, cosmologie, harmonie des sphères, arts technologiques, installations interactives, mathématiques, informatique.

KEYWORDS. Research-creation, architecture, spectral music, cosmology, harmony of the spheres, technological arts, interactive installations, mathematics, computer science.



Figure 1. Une lanterne harmonique.

1. Introduction

Si les contours de la recherche-création restent encore indistincts, de premières tentatives de définition peuvent déjà être cernées par la négative. Il en va ainsi des pratiques qui se situent clairement hors de son périmètre, telles les démarches de création qui exploitent des dispositifs technologiques dans les modalités précises pour lesquelles ils ont été créés, sans ancrage théorique ni retour critique sur l'œuvre produite ni sur la technologie proprement dite. À l'opposé, d'autres travaux situent immédiatement leurs auteurs comme chercheurs-créateurs, du fait qu'ils recoupent un ensemble de critères que l'on retrouve dans la plupart des définitions recensées dans la littérature. On notera qu'un artiste décide rarement, de façon délibérée, d'amorcer une démarche de recherche-création. C'est la plupart du temps *a posteriori*, par le regard rétrospectif de l'artiste sur son œuvre, ou par l'interprétation qui en est faite par le milieu, les différents publics ou les médias, que ce positionnement s'établit.

Tous les travaux issus de notre laboratoire sont ainsi nés *a priori* au niveau de leur positionnement, à partie d'une vision précise : faire chanter les nuages, générer des architectures à partir de pièces musicales, créer des cubes volants autonomes, transformer une mélodie par le génome d'une bactérie... Leur concrétisation a fait appel à différents principes technologiques et scientifiques parfois avancés, nécessitant la collaboration d'experts de différents domaines. Dans chaque cas, tout au long du processus, de nouveaux développements sont survenus. Certains ont mené à des premières technologiques. Si dans chaque cas, ce même processus restait constamment orienté vers la réalisation de l'œuvre finale, des transferts réguliers ont pu se faire vers d'autres disciplines, par le biais d'articles ou de conférences diffusés tant dans les milieux technologiques que dans les milieux artistiques.

Le présent article est destiné à présenter un objet qui, tant par son design que par ses fonctionnalités, résulte de la convergence de faisceaux de sens et de signification dont les ramifications s'ancrent dans plusieurs strates historiques, géographiques et culturelles. Baptisé *Lanterne harmonique*, il est issu d'un programme d'investigation et de création artistique en cours depuis plusieurs années, intitulé *Point d'Origine*, dont sont issues deux installations majeures, et bientôt une troisième. *Point d'Origine* consiste à proposer une version poétique et contemporaine du modèle cosmologique antique de l'harmonie des sphères, revisité à la lumière de ce que la science contemporaine nous dit du cosmos, de la musique et de l'acoustique, et du potentiel de certains outils mathématiques développés dans le courant du XVIII^e siècle. Comme nous le verrons, et bien que la discussion reste ouverte, la plupart des caractéristiques de

ce programme, ainsi que sa situation par rapport aux pratiques de l'art contemporain, permettent de le positionner assez précisément comme une démarche de recherche-création.

2. Le programme *Point d'Origine*

La forme de la lanterne harmonique, dont une photo apparaît en tête du présent article [*Fig. 1*], est très simple, et même élémentaire. Elle évoque un œuf légèrement aplati à la coquille couleur vert d'eau, très mate et légèrement translucide. Au toucher, sa texture très douce est celle d'un galet longuement poli par la mer. À l'intérieur, quelques lueurs palpitanter lentement en alternance, comme animées par une respiration. Elles traduisent l'état des composantes électroniques qui en remplissent complètement le volume. Hautement technologique, la lanterne contient en effet plusieurs dispositifs : un système de localisation, un microcontrôleur, des cartes mémoire sur lesquelles sont enregistrés plus de 200 000 fichiers sonores à haute résolution, des batteries rechargeables, une carte de connexion, une carte de son, une carte Bluetooth, ainsi qu'une série de connecteurs et de câbles qui assurent le dialogue entre ces éléments. La lanterne peut de surcroît communiquer avec l'extérieur et recevoir des instructions, à la manière d'un site web nomade. Son rôle consiste à repérer, à l'intérieur d'un édifice remarquable, la position précise de celui qui la porte ; celui-ci est également muni d'une paire d'écouteurs sans fil à réduction de bruit active. À intervalles réguliers et très brefs, elle associe à cette position un échantillon musical correspondant à la transposition de l'architecture en musique calculée à partir de cette même position, puis transmet cet échantillon aux écouteurs sans fil du porteur.

Cette lanterne harmonique a été utilisée dans le cadre d'une installation que nous avons présentée en 2019 au château de Chambord. Elle faisait suite à une installation déployée en 2017 en la cathédrale de Mende, en Lozère ; une première version de la lanterne avait été développée à cette occasion. Pourquoi Mende, et pourquoi Chambord ? Une réponse détaillée dépasserait le cadre et le format du présent article ; la section 4 ci-dessous donne toutefois quelques précisions à ce sujet. Plusieurs articles antérieurs [REE 16, REE 20], ainsi qu'un site web dédié¹, permettront également aux lecteurs intéressés d'en prendre connaissance. L'élaboration du programme lui-même, ainsi que ses ancrages historiques et théoriques, sont décrits de façon exhaustive dans une thèse doctorale préparée à l'université de Plymouth, au Royaume-Uni [REE 19]. Dans l'immédiat, mentionnons simplement qu'il a pour objectif la transposition musicale d'architectures remarquables, et concerne plus spécifiquement celles qui se présentent comme des échos des cosmologies de leur époque : leur plan et leur morphologie générale sont explicitement déterminés par l'imaginaire associé à ces cosmologies, plutôt que par des considérations pratiques, programmatiques ou fonctionnelles. Chambord en est un exemple éloquent : le château, en particulier sa section centrale, appelée donjon, bien que ni sa forme, ni sa fonction ne correspondent à cet élément de l'architecture militaire médiévale, se présente littéralement comme un rêve de pierre ; elle devient même par endroits un véritable délire minéral. Ni sa géométrie, ni son organisation interne ne répondent à une justification rationnelle quelconque ; elles peuvent même apparaître comme des défis à la raison. Le plan, contrôlé par un groupe rigide de symétries et de rotations [*Fig. 2*], correspond à la représentation d'un schème cosmologique évoquant les rôles respectifs du roi et de Dieu dans les affaires terrestres et célestes. On l'attribue au moins partiellement à Léonard de Vinci [TAN 92, BRY 07], bien que cette hypothèse ne soit corroborée par aucun document écrit, et bien que la mort du polymathe toscan soit intervenue en 1519, soit l'année même de la pose de la première pierre. Un bon nombre d'études et de présomptions crédibles converge toutefois vers cette hypothèse, sur laquelle nous nous appuierons dans le cadre du présent article.

¹ <https://pointdorigine.nxigestatio.org>, consulté 15/08/2025

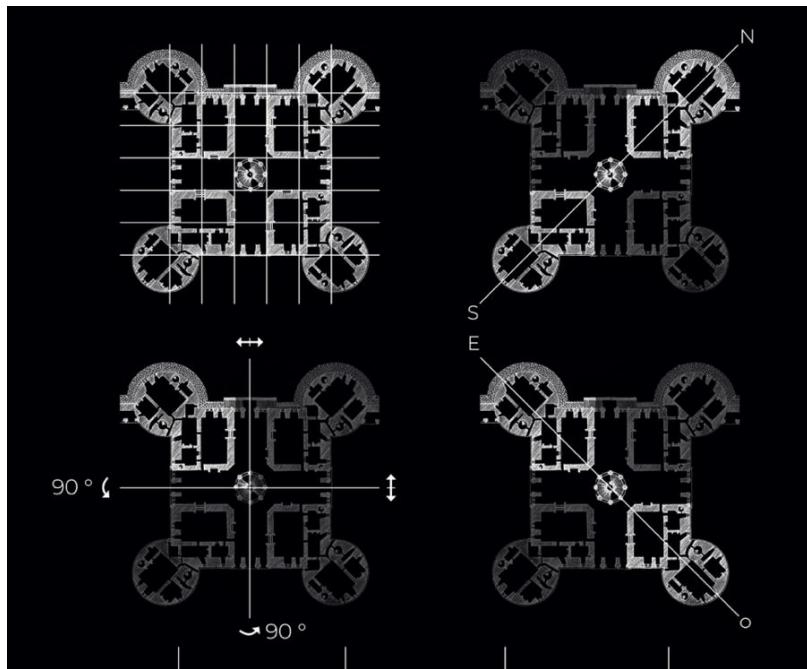


Figure 2. Régularités, symétries et orientation dans le plan du donjon de Chambord.

3. Une musique pour un temps immobile

Les photos suivantes [Fig. 3, 4, 5] montrent des visiteurs en train d'expérimenter *Point d'Origine* en la cathédrale de Mende. Comme il est précisé plus haut, cet événement faisait appel à une première version de la lanterne harmonique, un peu plus simple et technologiquement moins élaborée que celle de Chambord, mais basée sur les mêmes principes. L'œuvre est à la portée de tous les publics et des personnes de tous les âges. Le visiteur, muni d'un casque d'écoute de haute qualité prêté pour le temps de la visite, déambule dans le bâtiment en portant la lanterne à la manière d'un cierge. Dès qu'il se met en marche, la musique commence ; elle s'arrête lorsqu'il s'immobilise. Elle ne provient pas d'une analyse acoustique des différents espaces, ni d'une traduction en partitions musicales de la cartographie des lieux, mais résulte de la transposition en temps réel de l'architecture toute entière, considérée dans ses trois dimensions. Élaborée grâce à un objet mathématique appelé « harmonique sphérique », introduit par le mathématicien Pierre-Simon de Laplace en 1782, elle prend en compte la forme des espaces intérieurs de l'édifice, ainsi que celle de la matière des parois, des planchers et des toitures. La musique produite relève du domaine de la musique spectrale, qui s'intéresse autant à la matière propre des timbres sonores qu'aux séquences mélodiques proprement dites.

Du point de vue du visiteur, tout se passe comme si de petites gouttes de musique, suspendues dans l'espace à tous les trente centimètres comme une pluie immobile, remplissaient l'intérieur du bâtiment. En traversant chaque gouttelette, la lanterne harmonique déclenche un son correspondant à la transposition musicale de l'architecture, élaborée depuis l'endroit précis où elle se trouve. Une trajectoire architecturale et harmonique s'élabore ainsi en temps réel au gré des déplacements et des mouvements du visiteur, qui en devient simultanément le compositeur, l'interprète et l'audience. Le casque d'écoute, grâce à son dispositif de réduction de bruit, crée un silence propice à l'écoute et à la contemplation. Il s'est révélé particulièrement utile en un lieu comme Chambord, dont les espaces vastes et résonants réverbèrent fortement les bruits ambients, en particulier les voix parfois peu discrètes des très nombreux visiteurs.



Figure 3. Point d'Origine en la cathédrale de Mende (2017).
Les visiteurs utilisent une première version de la Lanterne Harmonique
branchée à des écouteurs filaires.



Figure 4 (à gauche) et 5 (à droite). Point d'Origine en la cathédrale de Mende (2017).
La simplicité d'usage de la Lanterne offre aux personnes de tous les âges
la possibilité d'expérimenter l'installation.

Mettre des écouteurs, puis se mettre en marche : cette simplicité et cette transparence d'usage sont caractéristiques des projets de notre laboratoire, qui tente dans la mesure du possible d'éviter de donner aux objets ou aux procédés destinés au public un aspect par trop technologique, qui pourrait se révéler intimidant, hermétique ou dissuasif. Malgré leur sophistication, malgré leurs nombreuses ramifications théoriques et historiques, toutes nos installations sont conçues à partir de ce principe qui leur permet de se prêter autant à des moments contemplatifs qu'à des épisodes très ludiques. La photo ci-dessous [Fig. 6] montre trois jeunes filles qui, dans une galerie du donjon de Chambord, se sont lancées dans une danse improvisée sur les harmonies du château, musique que leur propre danse, en une étonnante récursivité, déclenchaît, modifiait et prolongeait sans cesse.



Figure 6. Les danseuses de Chambord.

4. L'architecture comme un écho cosmologique

Pour revenir à la question du choix des édifices, dans le cas de Chambord, rappelons que la principale raison d'être du château est de proposer une représentation d'un modèle cosmologique. De façon plus précise, l'architecture évoque non seulement la puissance du roi François 1er sur la Terre, mais également la nature de son lien privilégié avec le Dieu des chrétiens. Les voûtes surbaissées qui recouvrent le deuxième étage sont faites de pierres sculptées - les voûtains - qui représentent en alternance une salamandre, animal emblème du souverain, et l'initiale de ce dernier, soit un F majuscule. Plus de quatre cents voûtains créent ainsi un ciel de pierre. Sur un seul d'entre eux, la lettre F est inversée comme par un miroir. Elle est ainsi lisible par Dieu depuis le ciel et réaffirme l'entente qui fait du roi le souverain du royaume terrestre, et du Créateur le maître des mondes célestes. Au centre du donjon se trouve l'escalier à double révolution, sans doute l'un des escaliers les plus connus de l'histoire de l'architecture. À la lecture du plan [Fig. 7], on a l'impression que tous les éléments de l'édifice, les tourelles, les cantons, les tours, les toitures, gravitent² littéralement autour de ce Soleil de pierre.

Si ce plan est attribué à Léonard de Vinci, c'est qu'il se déploie selon plusieurs principes géométriques caractéristiques de l'œuvre de cet artiste visionnaire qui, après avoir été invité par le roi lui-même, a vécu ses dernières années au Clos Lucé, à une cinquantaine de kilomètres de Chambord. Tout a vraisemblablement été dit sur ses inventions et ses œuvres, mais une lecture attentive de certains de ses écrits moins connus révèle une vision et des préfigurations stupéfiantes. On y retrouve par exemple une hypothèse selon laquelle la lumière et le son se propagent selon des phénomènes de même nature, analogues à celui des vagues sur l'eau. Il propose également l'amorce d'un programme d'investigation qui chercherait à vérifier si d'autres phénomènes du monde, tels que la masse des objets ou le passage des saisons, seraient explicables par des mécanismes de même nature : des flux et de courants dynamiques, parcourus d'ondes ou de vagues aux temporalités et aux amplitudes extrêmement variées.

² Le mot « gravite » pourrait ici apparaître comme un anachronisme, puisque l'identification de la gravité comme cause première de la révolution des corps célestes ne s'est faite qu'au XVIII^e siècle, avec Newton. Littéralement parlant, le mot « orbite » conviendrait mieux, mais il rendrait moins compte du rôle primordial que joue le souverain dans les affaires du monde, dont il est à la fois, dans la cosmologie de l'époque, le moteur et l'ordonnateur.

En lisant ce texte aujourd’hui, on ne peut s’empêcher de penser à la théorie de Fourier³, et même, en extrapolant à la limite du plausible, aux principes de base de la physique quantique, qui voient les particules élémentaires comme à la fois ondes et matière⁴.

Bien sûr, la nature de l’appareillage conceptuel et intellectuel disponible à l’époque interdit de tirer de telles conclusions. Mais pour toute personne versée dans l’histoire des sciences, même en considérant le génie de Léonard de Vinci, la seule intuition que le monde puisse se prêter à une description basée sur un formalisme ondulatoire est déjà révolutionnaire. Elle représente une fulgurance intellectuelle qui tient presque du prodige : si certains auteurs écrivent que dès le IIIe siècle avant JC, Chrysippe de Soles voyait le son comme un ensemble de vagues, la nature ondulatoire de la lumière n’a été avancée par Christian Huygens qu’un siècle et demi après la fondation du château au début du XVIe siècle ; l’hypothèse est tellement en avance sur son temps que l’on peine à en comprendre l’origine. Heureusement pour nous, De Vinci offre quelques pistes. En regardant les figures de réflexion et d’interférences créées par des vagues qui rencontrent des parois aux configurations variées, il comprend que l’écho entendu face à une paroi rigide doit provenir d’un phénomène de réflexion analogue, et que le son fait appel aux mêmes mécanismes. Puis il extrapole le raisonnement aux miroirs et affirme que la réflexion des images par une surface métallique doit procéder du même phénomène⁵. Il étend finalement le principe à d’autres aspects du monde, comme la masse des objets ou le passage des saisons, en un raisonnement presque visionnaire.

Cette extension à l’ensemble des phénomènes naturels serait tout aussi inexplicable si elle ne s’ancrait dans la conviction de Léonard d’un univers déterminé par un petit nombre de principes unificateurs, et de la similitude des phénomènes entre les mondes célestes et terrestres. Cette conviction l’amène à affirmer que dans les plus petites choses, on peut découvrir des images et des reflets de l’Univers dans son ensemble, et que toutes les figures du ciel se retrouvent sur la Terre à toutes les échelles. On comprend mieux dès lors le grand nombre de références cosmologiques qui apparaissent dans le plan du donjon de Chambord. C’est là une autre des raisons qui nous a fait choisir cet édifice pour la seconde version de *Point d’Origine*, un projet qui, comme nous le verrons dans la section suivante, s’ancre précisément dans la possibilité de décrire le château par formalisme ondulatoire.

Une autre hypothèse, dont les bases sont un peu plus tangibles, s’appuie sur des repères chronologiques. Le plan du château évoque, tel que mentionné ci-dessus, une cosmologie monarchique. Ses diagonales, orientées selon les points cardinaux, font du centre un *axis mundi* - un axe du monde autour duquel s’enroule l’escalier monumental qui mène au zénith. Or, le roi est au centre du cosmos terrestre, entendu comme l’ensemble des affaires humaines qui gravitent – et orbitent - autour de lui. L’analogie qui ne peut manquer de se faire entre le roi et le Soleil donne à ce plan l’allure d’un système planétaire héliocentrique, selon le modèle copernicien. Officiellement, ce modèle n’a commencé à se répandre que dans les années 1530, soit une douzaine d’années après la fondation du château ; et ce n’est qu’en 1543 que Copernic a – prudemment - fait publier après sa mort la description détaillée de cette hypothèse alors hérétique. Aucun document ne mentionne que Léonard de Vinci en ait eu connaissance ; elle était toutefois décrite dès 1514 (et peut-être même dès 1511) dans un petit ouvrage circulant sous le manteau [VER 89]. Sachant qu’il disposait d’un réseau privilégié de contacts avec les plus grands savants de son époque, et connaissant sa curiosité pour les avancées scientifiques et technologiques les plus récentes, il n’est pas déraisonnable de supposer qu’il en ait été informé, et que le donjon tout entier puisse effectivement être une évocation de ce modèle [Fig. 7].

³ Le théorème le plus connu de Fourier postule que tout son complexe (en fait, tout phénomène vibratoire) peut se décomposer en un spectre de sons ou de vibrations élémentaires, appelés « harmoniques », et peut être construit par l’addition de ces mêmes sons ou vibrations.

⁴ On pense à la théorie alors révolutionnaire du physicien Louis de Broglie, prix Nobel 1929, qui a postulé que la dualité onde-particule, loin de ne concerner que le photon, s’étendait à tous les corps matériels. Sa démonstration concernait d’abord l’électron, mais elle supposait également que tout objet ou ensemble d’objets pouvait être représenté par ce qu’il appelait des « ondes de matière ».

⁵ “La lumière est soumise aux lois générales du mouvement dont elle est une espèce. La réflexion de l’image dans le miroir est l’écho de la lumière. De même que la balle contre le mur, la vague contre le rivage, le son contre l’obstacle, le rayon lumineux est rejeté en arrière selon un angle de réflexion égal à l’angle d’incidence” [Léonard de Vinci, cahiers, section “Optique”, réf. manuscrit A9 V°].

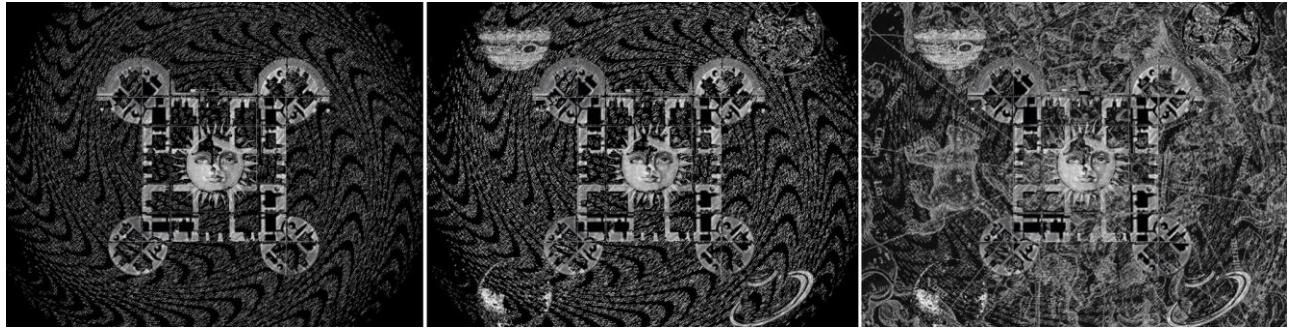


Figure 7. Comme le Soleil au centre du Système Solaire, et comme le roi au centre du monde terrestre, l'escalier à double révolution de Chambord entraîne progressivement le monde, les planètes, puis les cieux dans son mouvement.

Sur cette image, tous les éléments semblent en effet graviter autour de l'escalier central, dont la figure 8 en montre une photo à un moment où le plancher de l'étage a été temporairement retiré, ce qui permet de le voir dans son ensemble [Fig. 8]. Ce remarquable objet architectural, dont le plan original, jamais réalisé, comportait rien moins que quatre révolutions, concrétise de façon aussi somptueuse que monumentale la fascination de Léonard de Vinci pour le mouvement hélicoïdal, dont on retrouve de nombreuses représentations dans ses ouvrages. Il symbolise ici la toute-puissance du roi qui entraîne dans un mouvement ascendant l'espace et la matière du royaume vers le ciel et le Soleil. Ce n'est pas là qu'une façon de parler : dans les derniers niveaux, lorsque l'on arrive au clocheton central qui domine la terrasse et dont le style architectural est unique en France, les deux révolutions fusionnent en un escalier devenu simple qui poursuit sa montée en hélice autour d'un noyau de pierre. Or, ce noyau-là est encore plus étrange. D'une part, il est lui-même torsadé, comme si l'espace de l'escalier l'avait entraîné dans sa spirale vers le ciel. D'autre part, il comporte ça et là de petits éléments apparemment difformes, presque des rogatons de pierre, coincés entre deux nervures.



Figure 8. Escalier à double révolution, dont on voit la course sur deux étages. On distingue clairement, sur les voûtains sculptés, l'alternance entre la figure de la salamandre et l'initiale F du nom du roi.

Leur disposition ne montre à première vue aucune régularité apparente : on pense à des erreurs de sculpture, à un problème de finition. En y regardant de plus près, on constate qu'il s'agit des éléments d'une colonne corinthienne étirée en spirale, en une impossible déformation anamorphique. Tout se passe comme si la colonne était faite de latex et que les tailleurs de pierre avaient réussi à la tordre et à l'étirer à l'extrême limite de son élasticité, comme un linge que l'on essore [Fig. 9]. La puissance du roi est telle que même la pierre se plie à sa volonté, entraînée par l'immense mouvement de rotation ascendante qui détermine l'architecture du Château et relie, encore une fois, le royaume des humains au royaume divin.

Planifié selon une structure symbolique, Chambord, comme il a été dit, constitue un défi à la rationalité et au sens pratique. Cet aspect se manifeste jusque dans les origines mêmes de l'édifice. Fait d'une pierre friable et poreuse, construit sur un marécage et reposant principalement, comme les palais vénitiens, sur des milliers de pieux de bois qui s'enfoncent jusqu'à douze mètres pour trouver du sol ferme, sa construction a nécessité de dévier une rivière - le projet original envisageait même de dévier la Loire. Sa fonction devait être celle d'un pavillon de chasse, mais encore une fois, les dimensions et les moyens mis en œuvre montrent que ce motif était un prétexte, de même que son utilisation effective : François 1er lui-même, passionné de chasse, n'y a passé que quarante-deux nuits



Figure 9. Les irrégularités apparentes dans les nervures du noyau de l'escalier qui mène au sommet de la lanterne centrale résultent en fait de l'anamorphose en spirale des éléments d'une colonne corinthienne. Elles témoignent de l'incroyable maîtrise des tailleurs de pierre de l'époque.

C'est aussi l'un des endroits les plus inconfortables qui soient. À peu près inhabitable, impossible à chauffer, il n'a été terminé par Louis XIV que deux siècles après sa fondation avant d'être habité par le maréchal de Saxe. Des pièces fermées en bois, doublant les parois de pierre, ont dû être construites pour conserver un minimum de chaleur et apporter un semblant de confort. La première fois que l'on y pénètre, on reste étonné : loin des fastes de Versailles, loin de la délicatesse précieuse de Chenonceaux ou d'Azay-le-Rideau, le rez-de-chaussée évoque plutôt une écurie surdimensionnée qu'un château royal. Aucun élément de prestige, quasiment ornementation. Malgré les proportions, malgré la magnificence de l'édifice, l'intérieur est presque rudimentaire. Seul l'escalier central attire le regard.

On a ici affaire à une architecture aux limites sans véritable utilité fonctionnelle, contrainte et définie par un principe géométrique implacable. C'est loin d'être le seul exemple : il est rejoints dans cette catégorie par plusieurs bâtiments majeurs dont le plan, indifférent à l'usage et à la pratique, se soumet à des symétries symbolique aussi parfaites que coercitives, et qui de surcroît s'orientent systématiquement par rapport aux points cardinaux, en un rapport au cosmos aussi primordial qu'immédiat. On pense à la Villa Rotonda, de Palladio, construite en 1546 ; au Taj Mahal, mausolée de marbre blanc construit deux

siècles plus tard ; où à l'intrigant Castel del Monte, dans les Pouilles, un bâtiment octogonal encore plus mystérieux qui date du XIII^e siècle et dont personne, encore aujourd'hui, n'a élucidé la fonction ni même la raison d'être [Fig. 10]. En une antisymétrie séculaire avec *Point d'Origine*, une hypothèse récente y voit la transposition architecturale d'une théorie musicale ancrée dans la cosmologie de son époque [ZAR 11]. Dans le champ de l'architecture, de tels édifices s'apparentent à la catégorie des folies architecturales : des bâtiments d'une opulence ou de forme disproportionnée à leur usage annoncé, conçus selon des principes étrangers aux besoins de la pratique et du quotidien, qui ont connu un fort regain de popularité au XIX^e siècle. C'est essentiellement ce faisceau de relation historiques, cosmologiques et théoriques qui nous a fait choisir Chambord comme lieu de la seconde étude du programme *Point d'Origine*.

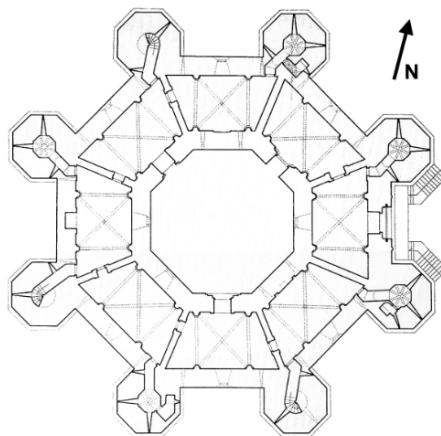


Figure 10. La fonction précise du Castel del Monte, dans les Pouilles (Italie), qui date du XI^e siècle et dont la géométrie, plus rigide encore que celle de Chambord, reste incomprise. Une hypothèse récente en fait la transposition architecturale d'une théorie musicale.

4. Le réel comme un tissage d'ondes

Décrire un bâtiment par un vocabulaire d'ondes sonores demande la réalisation d'un modèle numérique aussi précis que possible, ce qui, dans le cas d'une cathédrale gothique comme Mende ou d'un château comme Chambord, présente de sérieux défis : un simple regard sur les deux édifices suffit pour s'en convaincre. Les modèles que nous avons utilisés ont été réalisés par l'architecte Guillaume Crédoz⁶. Véritable sorcier de la modélisation informatique, travaillant à partir de photos, de plans lacunaires ou imprécis (aucun des originaux de Mende ou de Chambord ne subsiste), de relevés sur place, de schémas et d'esquisses, de crapahutages dans des combles étroits uniquement fréquentés par des chauves-souris, l'architecte a produit des simulations d'une précision remarquable. Ce sont les seuls modèles qui, à la date de réalisation des projets, modélisaient l'ensemble des édifices, incluant leur complexe anatomie interne [Fig. 11 et 12].



Figure 11. Modèle numérique de la cathédrale de Mende en cours de réalisation.

⁶En plus d'être cité comme co-auteur du présent article, Guillaume Crédoz est l'auteur principal d'un autre article qui apparaît dans la présente revue, dont la teneur montre l'étendue du spectre de ses activités.

La deuxième étape consiste à diviser le modèle en coquilles sphériques concentriques de rayon croissant dont on spécifie le nombre, les intervalles et les épaisseurs [Fig. 13]. L’intersection de ces coquilles avec la matière du château détermine des motifs d’intersection qui dépendent de leur rayon et de la position de leur centre [Fig. 14]. Chacun de ces motifs d’intersection est ensuite décomposé en harmoniques sphériques, objets mathématiques que l’on peut décrire comme des « vagues » élémentaires parcourant une sphère en direction équatoriale ou en direction méridienne. On peut faire une analogie avec d’immenses tsunamis balayant une planète entièrement inondée et se croisant localement à angle droit. Selon le même principe que le théorème de Fourier, à la manière des ondes sonores sinusoïdales dont l’addition peut reproduire n’importe quel son, les harmoniques sphériques permettent de reconstruire n’importe quel motif à la surface d’une sphère. Comme le formalisme de l’harmonique sphérique est le même, à une dimension près, que celui des ondes sonores, la conversion musicale, sans être immédiate, se fait quasi naturellement.

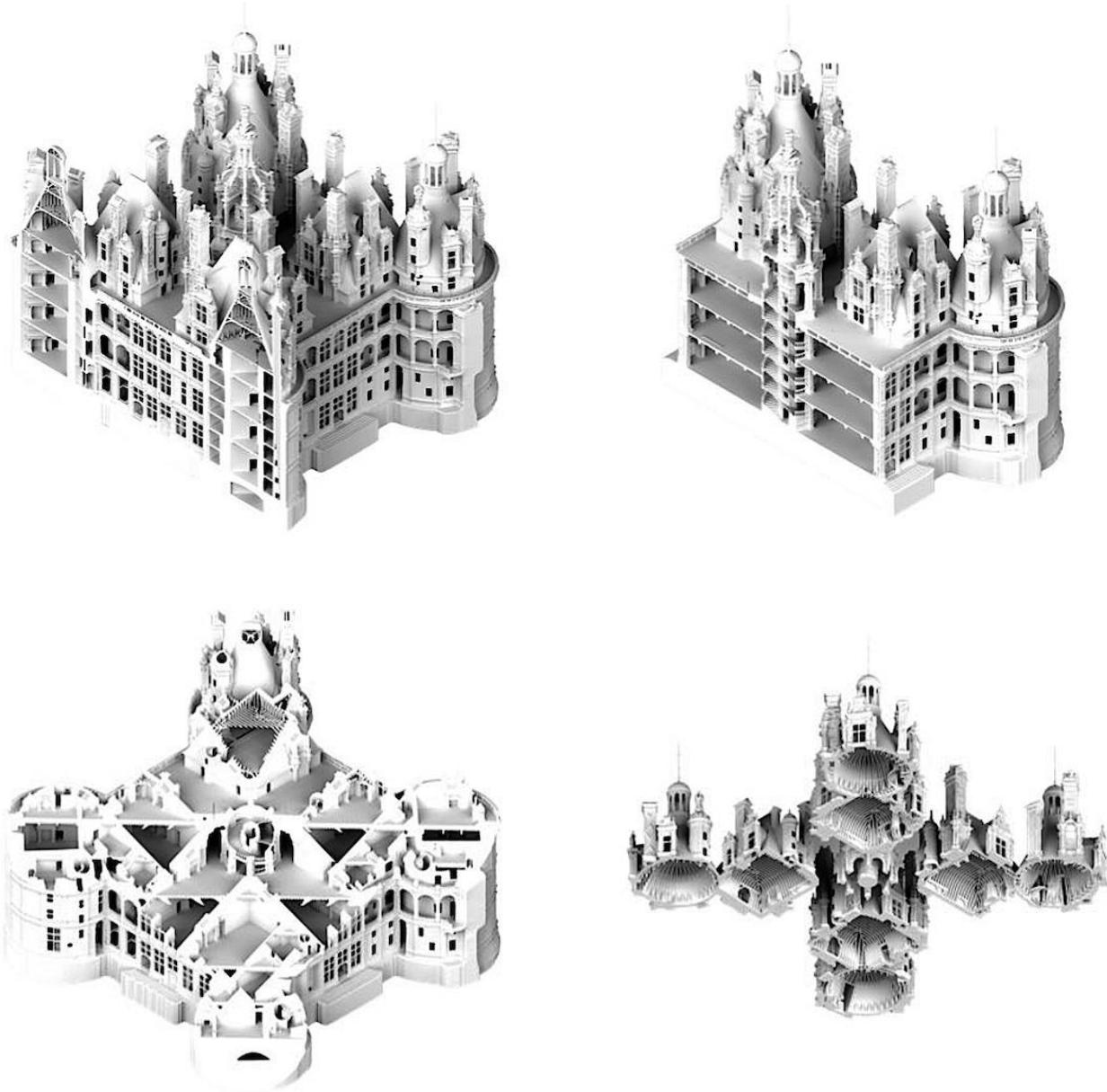


Figure 12. Simulation numérique du château de Chambord. En date de réalisation, ce modèle, qui représente jusqu’aux éléments de charpente, était le seul à révéler l’anatomie interne de l’édifice.

La forme du château est ainsi recréée par ce que nous avons appelé plus haut un tissage d’ondes : les éléments matériels massifs tels que les parois et les charpentes naissent des interférences constructives des harmoniques sphériques, alors que les vides tels que les pièces, les galeries, les combles, sont générés

par les interférences destructives entre ces mêmes ondes, qui, mathématiquement parlant, remplissent tout l'espace.

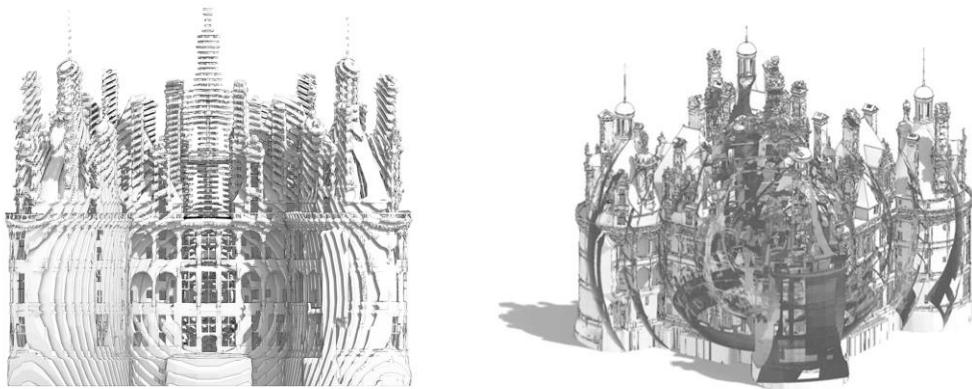


Figure 13. Élévation et axonométrie du donjon de Chambord après division en coquilles sphériques.

C'est ainsi que la musique peut naître. Le personnage qui se déplace à l'intérieur du château transporte avec lui ses coquilles sphériques dont la transposition musicale, recalculée à tous les trente centimètres, compose une trajectoire harmonique qu'il peut infléchir à sa guise, en recherchant les correspondances entre la musique produite et l'ambiance des lieux qu'il parcourt [Fig. 15]. Comme on peut le voir, les premières étapes du processus sont strictement formelles, et même déterministes : jusqu'ici, la séquence est entièrement réversible, dans la limite de la précision adoptée pour la transposition initiale.

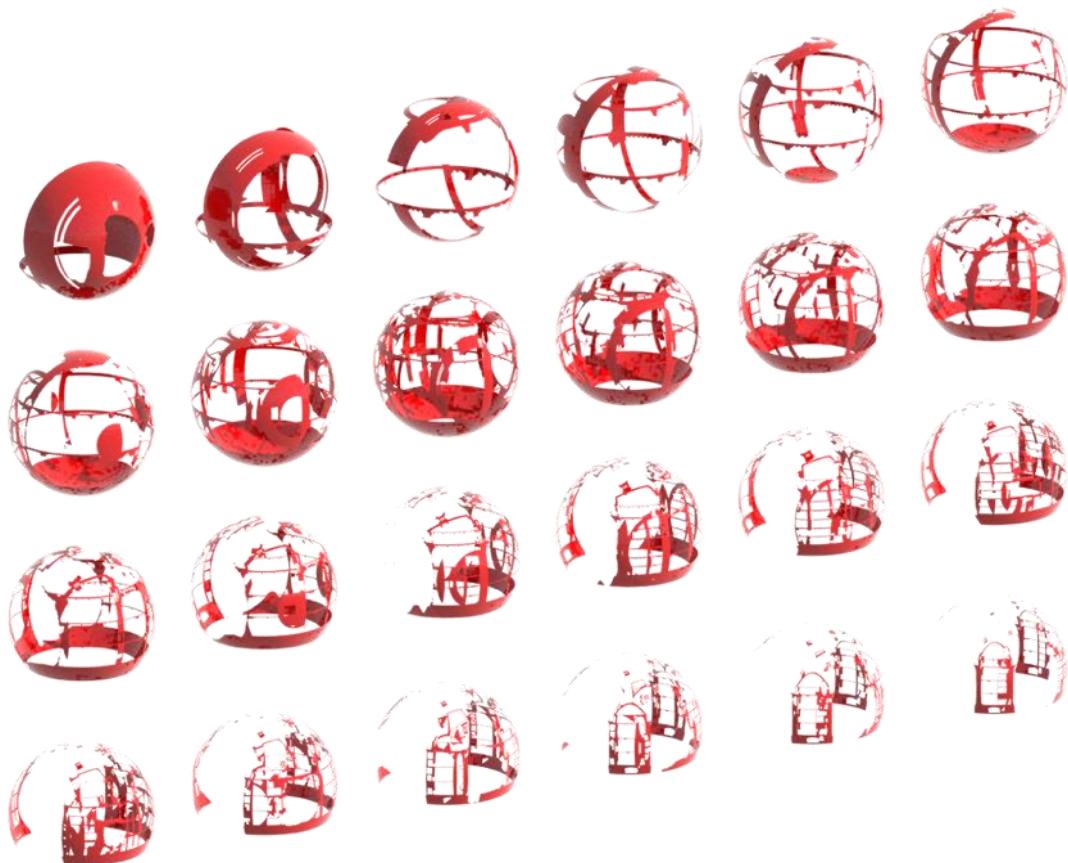


Figure 14. Séquence des motifs d'intersection successifs entre le donjon et une série de coquilles sphériques concentriques de rayon croissant (le rayon des coquilles est normalisé sur l'image).

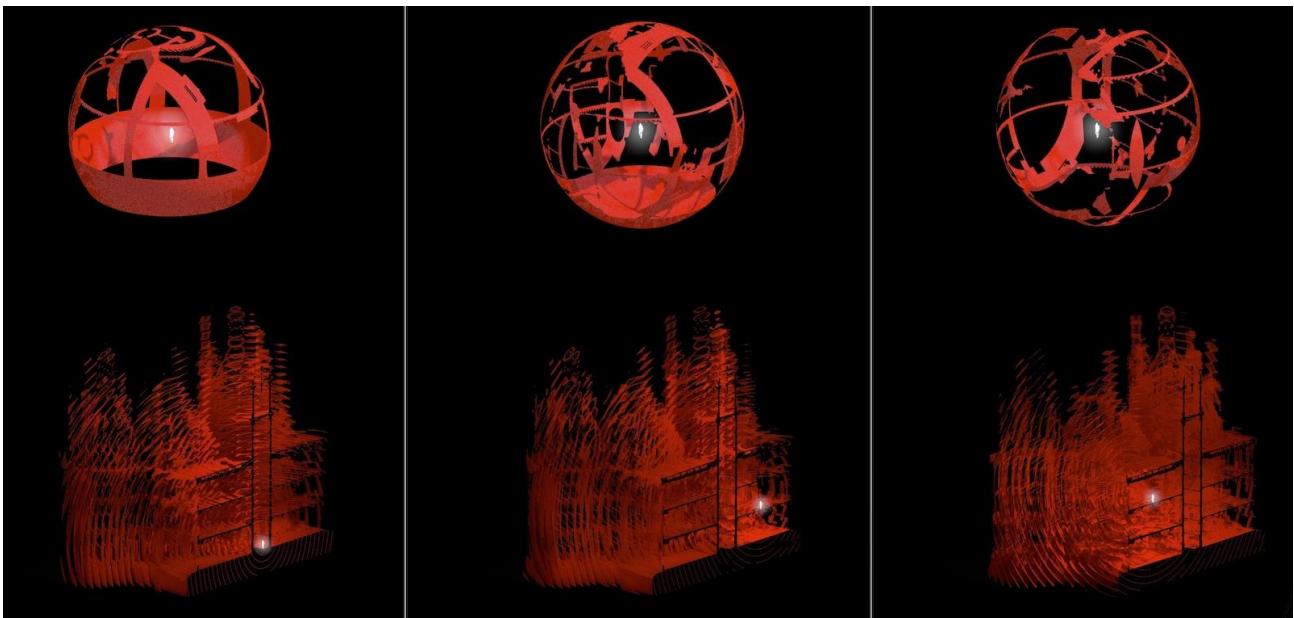


Figure 15. Le visiteur (en blanc) porte avec lui sa série de coquilles sphériques, dont il occupe toujours le centre. Sur la série du haut, il n'en porte qu'une seule ; il en porte une vingtaine sur celle du bas. Ses déplacements modifient constamment les motifs d'intersection avec le château, qui eux-mêmes déterminent les sons qui seront entendus à l'endroit où il se trouve.

Il peut paraître paradoxal de tenter la description d'une architecture par un ensemble d'ondes, des objets dont l'immatérialité contraste fortement avec la masse et la solidité des pierres et du bois de charpente, et qui de plus ne sont ici que des abstractions mathématiques. Sur le plan conceptuel toutefois, cela ne fait aucune différence avec une description basée sur des objets géométriques. Il semble plus naturel et plus simple de décrire un édifice au moyen de formes familières, comme cela se fait habituellement. Une telle description du donjon de Chambord ferait état d'un cube flanqué en ses coins de quatre gros cylindres, eux-mêmes surmontés de cônes tronqués coiffés de petits cylindres et de demi-sphères. C'est oublier que ces formes géométriques elles-mêmes, tout comme les ondes, sont des entités abstraites. La seule différence se situe au niveau de leur correspondance avec la forme du château, qui est nettement plus intuitive. Mais le château lui-même n'est fait ni de formes géométriques, ni d'interférences d'ondes dans une région délimitée de l'espace : il ne s'agit que de deux façons différentes d'en décrire la forme.

Dans les deux cas, des décisions d'ordre arbitraire doivent être prises selon l'usage que l'on veut faire du modèle, en particulier au niveau de la précision recherchée ; celle-ci peut être aussi grande que l'on veut, pourvu que l'on y mette les moyens et le temps nécessaires. La principale différence entre les deux méthodes se situe au niveau de la quantité de données à traiter, et des méthodes mathématiques et géométriques requises pour leur traitement : une description ondulatoire implique un travail bien plus considérable qu'une description géométrique. Sans le recours à l'informatique, et à la technologie en général, les temps requis pour développer les installations du programme *Point d'Origine* deviendraient irréalistes. On notera aussi qu'à la différence d'une description géométrique, qui peut demander un vocabulaire de formes très étendu pour décrire les masses et les espaces d'un bâtiment, la description ondulatoire arrive au même résultat avec un seul objet, l'onde, qui, par de simples modifications de trois paramètres – la fréquence, l'amplitude, la phase – rend compte non seulement de toutes les configurations possibles, mais également des pleins et des vides, en une manifestation éloquente du pouvoir unificateur de ce formalisme.

5. Élaguer la jungle harmonique

Une fois cette étape accomplie, la phase artistique du travail peut commencer : le projet sort du domaine formel pour entrer dans celui de la subjectivité et de l'imaginaire. C'est le moment où s'amorce la composition musicale, qui, tel que mentionné plus haut, relève du domaine de la musique spectrale, en ce sens que le travail s'effectue autant sur les timbres sonores que sur les échantillons mélodiques qui seront assemblés pour produire la musique. En ce sens également qu'à rebours de la composition classique, qui dispose et arrange des sons musicaux dans un espace initialement silencieux, l'espace de départ est ici totalement saturé de sons. La transposition génère en effet des centaines de milliards d'harmoniques, en une masse sonore impossiblement compacte et indistincte qui ne généreraient à l'écoute qu'un bruit blanc continu. Il convient d'entrer dans cette masse et de l'élaguer pour produire des sons discernables et signifiants dont la juxtaposition générera une séquence musicale fluide et cohérente.

Au niveau artistique, le cœur du projet consiste à associer les ambiances et les impressions induites par la musique à celles de l'architecture des différents lieux de l'édifice, une tâche pour laquelle il n'existe pas de méthode. Cette exploration musicale de l'univers sonore engendré par la transposition ondulatoire de l'édifice constitue à la fois la raison d'être et la justification ultime du projet, ainsi que la principale - sinon la seule - de ses composantes qui soit susceptible d'en déterminer la réussite ou l'échec. À cette fin, les espaces du château ont été divisés en près de quatre-vingt-dix régions définies par leurs ambiances spécifiques, chacune associée à l'élaboration d'une atmosphère musicale [Fig. 16].

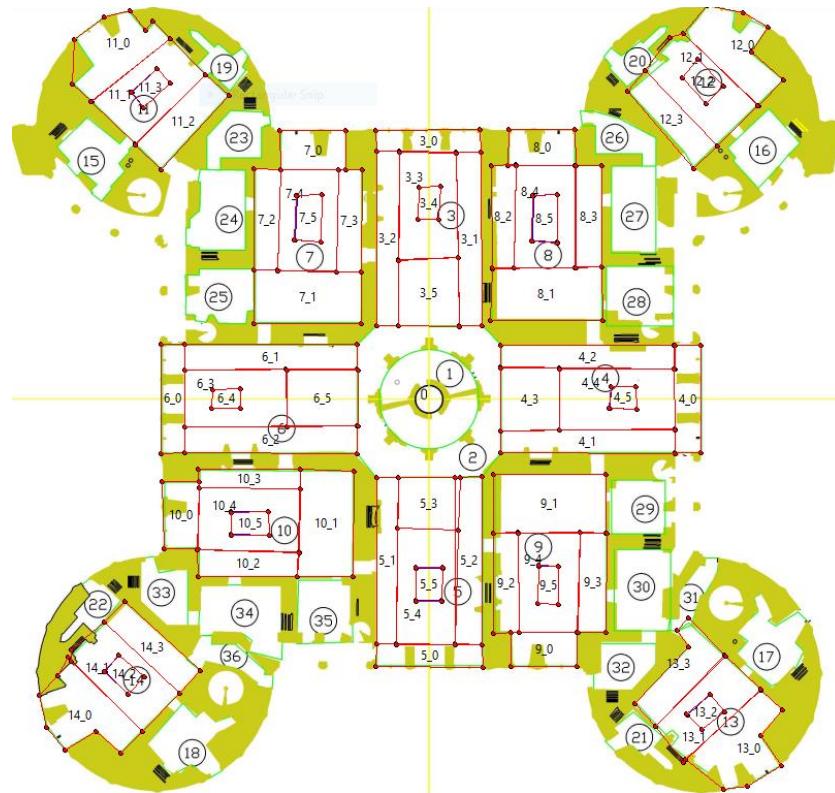


Figure 16. Au début du processus de composition, près de quatre-vingt-dix régions sont définies en fonction de leur ambiance architecturale spécifique. Le rôle – et le défi – du compositeur est d'associer à chacune de ces zones un arrangement des harmoniques qui tente d'établir une correspondance entre cette même ambiance et l'atmosphère musicale qui sera produite par la trajectoire du visiteur.

Le processus de composition proprement dit s'est alors amorcé, avec pour objectif la génération des dizaines de milliers d'échantillons musicaux requis pour couvrir l'ensemble de l'installation [Fig. 17]. Les positions potentielles des visiteurs correspondaient à plus de 200 000 points, les « points harmoniques », qui s'étendaient sur l'espace du château jusqu'à une hauteur de plus de deux mètres et se répartissaient selon une grille tridimensionnelle d'une maille de trente centimètres. À chaque position, les harmoniques sphériques correspondant à vingt coquilles concentriques ont été calculées ; un

échantillon sonore unique a été composé et élaboré à partir de chacune de ces positions. Cette dernière étape, qui a dû être effectuée en temps réel, a demandé près de trente jours de calcul sur vingt-huit ordinateurs travaillant jour et nuit.

Simultanément, la nouvelle lanterne harmonique, celle dont une photo apparaît en tête de cet article [Fig. 1], a été développée à partir d'études poussées au niveau du design, de l'ergonomie et de l'électronique. Conçue par une équipe qui regroupait des étudiant/e/s de l'école de design de l'UQAM et de l'École Polytechnique de Montréal, ce concentré très dense de technologies compactées à l'intérieur d'un volume très restreint a présenté de nombreux défis, notamment au niveau de l'évacuation de la chaleur produite par les composantes. Elle a par ailleurs donné lieu à des premières technologiques, notamment au niveau du processus de localisation [CAO 19]. La complexité et le nombre des espaces de Chambord, ainsi que le statut de monument historique de l'édifice, proscrivaient en effet l'utilisation d'un système standard pour lequel plus de deux cents balises, alimentées par batteries ou par câble, auraient dû être fixées aux murs à raison de trois ou quatre par pièce. Il a fallu concevoir et implémenter un dispositif fonctionnant par relais, dans lequel chaque lanterne se localisait à partir d'un nombre beaucoup plus restreint de balises en évaluant constamment sa position par rapport aux lanternes portées par les autres visiteurs.

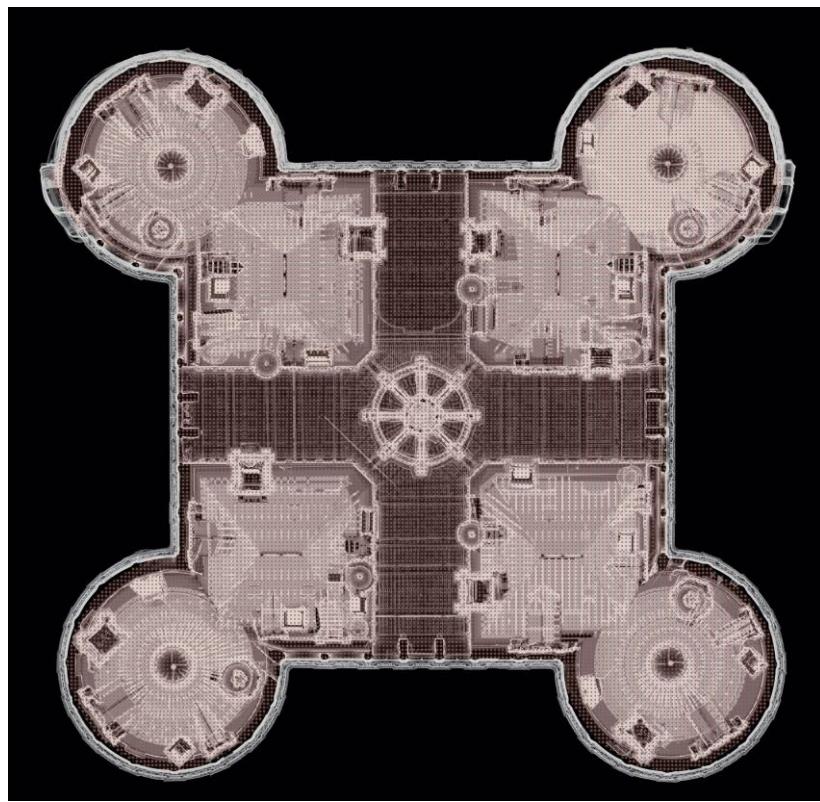


Figure 17. La transposition du château en musique est calculée à partir de plus de 200 000 « points harmoniques », représentés en rose sur cette image, disposés dans l'espace selon une grille tridimensionnelle d'une maille de 30 cm.

5. La lanterne harmonique : une convergence de savoirs et de disciplines

Extrêmement compacte, de texture très douce grâce à un polissage manuel, la lanterne reste tiède au toucher du fait de la chaleur émise par ses composantes internes. Sa forme évoque le croisement d'un galet de rivière et d'un œuf, dont la taille et la forme ovoïde facilitent la préhension par des mains de tous les âges. Comme il est mentionné plus haut, les coquilles, légèrement translucides, laissent voir les palpitations des lueurs internes qui traduisent les états internes de l'électronique. Faites de résine, individuellement moulées une par une, elles sont doublées à l'intérieur par une couche irrégulière de silicium appliquée à la main, évoquant une membrane biologique. Vingt-neuf lanternes en tout ont été produites, qui ont demandé des ajustements jusqu'à la toute dernière minute avant l'ouverture [Fig. 18].

Leur surface ne présente que très peu d'éléments : sur une extrémité, un micro-connecteur de charge, de toutes petites vis de fermeture se disposent de façon à esquisser le visage d'un batracien [Fig. 19] ; sur l'autre, de petits trous, disposés de façon à écrire en alphabet braille le numéro de chaque lanterne, assurent l'évacuation de la chaleur.

Non seulement l'objet se présente-t-il comme un concentré d'électronique, d'informatique, de musique et de mathématiques, mais il doit sa forme à un ensemble de déterminants théoriques et historiques. Au-delà des considérations ergonomiques, elle évoque l'œuf d'un batracien tel que la salamandre, animal emblème de François 1^{er}. L'œuf en lui-même est un puissant symbole, fréquemment et historiquement associé à la notion d'origine, et ce dans maintes régions du monde ; on le retrouve jusque dans des textes sanscrits datant de plusieurs siècles avant notre ère.



Figure 18. Samuel Arseneault (à gauche) et David St-Onge (à droite) en train de finaliser l'ajustement des Lanternes Harmoniques de Chambord avant l'ouverture de l'installation.

La cosmologie contemporaine occidentale n'y fait pas exception, qui voit l'abbé Lemaitre proposer en 1931 le concept d'œuf primordial, en une prémonition de la théorie du Big Bang, une trentaine d'années avant qu'elle ne devienne le modèle cosmologique dominant. Dans le cadre de *Point d'Origine*, l'œuf évoque le fait que toute architecture peut se lire comme une petite cosmologie avec ses règles, sa cosmogonie, sa configuration spatiale, son évolution temporelle. Comme on le sait, la cosmologie contemporaine ne permet pas de déterminer, dans l'Univers, un point privilégié qui aurait le statut de centre du monde. Comme on le sait également, il n'en a pas toujours été ainsi : les précédents modèles du cosmos, de Pythagore à Ptolémée en passant par Copernic, Kepler, et bien d'autres, ont postulé l'existence d'un tel centre, situé quelque part à proximité de la Terre ou du Soleil. Il est d'ailleurs instructif de faire correspondre les grandes étapes de l'histoire des cosmologies occidentales à celles des déplacements du centre du monde, partant d'un cosmos muni d'un *point d'origine* pour arriver un univers où il n'y a *point d'origine* ; c'est le constat qui a donné son titre à l'installation et au programme.

Paradoxalement complexe par rapport à sa simplicité géométrique, la lanterne harmonique dans sa version la plus récente voit sa forme et son usage simultanément déterminés par son positionnement à la confluence de multiples champs disciplinaires et aux contraintes physiques, symboliques et poétiques du contexte pour lequel elle est prévue. Elle s'ancre dans les considérations historiques qui ont mené à la création du château de Chambord, qui reste encore aujourd'hui une singularité architecturale du patrimoine des monuments de France. Elle invoque un symbolisme transculturel des origines qui date des premiers temps de l'histoire. Son rôle et sa fonction la situent dans le champ artistique en général, et musical en particulier. Le choix d'une méthode de composition relevant de la musique spectrale implique le recours à la théorie des ondes, à la science de l'acoustique, ainsi qu'à plusieurs théories musicales en vigueur depuis le milieu du XXe siècle. Son esthétique et son ergonomie, qui visent à la rendre aussi agréable à la vue qu'au toucher et à l'usage pour les personnes de tous les âges et de toutes les origines, ont demandé un important travail de design. L'utilisation du braille pour les ouvertures de dissipation de chaleur et pour l'identification des lanternes évoque la connexion qu'elle établit entre la vue, le toucher et l'audition, trois modes de perception qui, par recouplement, ajustent constamment notre appréciation du réel. Elle a été le sujet de plusieurs conférences et publications, dans les milieux artistiques comme dans les milieux technologiques. Dans ces mêmes milieux, elle a mené, à son échelle, à la production de connaissances nouvelles qui ont déjà commencé à essaimer⁷.

La prochaine version de l'installation, actuellement en cours de développement pour une vaste église montréalaise, tentera d'utiliser les méthodes et les technologies élaborées depuis le début du programme pour faire apprécier l'architecture de bâtiments remarquables à des personnes dont la vue est absente ou déficiente, par le biais de cette transposition musicale⁸. Indissociable de ces connexions historiques, théoriques et disciplinaires, déterminée par des contraintes de contexte et d'usage qui, loin d'apparaître comme des obstacles, deviennent de véritables partenaires de conception, ouverte à une évolution constante sur tous ces plans, la Lanterne Harmonique nous est progressivement apparue comme représentative du potentiel de la recherche-création, et ce quelle que soit la définition que l'on adopte pour ce terme.

5. En guise de conclusion : le travail sans filet de la recherche-création

Comme toutes les installations artistiques faisant intensivement appel à la technologie, celles que nous avons présentées, parfois développées sur plusieurs années, sont nées d'entreprises à risque : ni les moyens engagés, ni le temps passé à la réalisation, ne permettent d'en prédire le succès ou l'échec sur le plan artistique. Malgré le travail accompli, malgré le regroupement serré des expertises et des savoirs qui en imprègne tous les aspects, si elles ne rejoignent aucune audience, si aucun public n'est au rendez-vous, la démarche qui les sous-tend n'aura servi à rien et l'aventure se terminera sur un échec. Cette inquiétude, cette crainte face au risque d'une rencontre manquée, imprègnent chaque étape du développement. Plusieurs semaines ont été nécessaires après la mise en route de nos installations pour recueillir et compiler les réactions des différents publics, soit verbalement, soit par le biais des médias, soit par les impressions écrites dans les livres d'or mis à disposition au sortir des édifices, et confirmer la validité de nos hypothèses.

Les œuvres issues du programme *Point d'Origine* ne sont pas les seules dans cette situation, loin s'en faut. Du fait de leur unicité et de leurs singularités, de nombreux projets associés à la recherche-création échappent aux critères de validation de l'art contemporain, pourtant très larges. Bien que l'objectif final soit clairement artistique, ni la démarche, ni le processus de création ne se laissent aisément classer du côté de la science, de l'art ou de la technologie. Les trois s'y fondent de façon parfois symbiotique. La question de la validation d'entreprises relevant de trois formations culturelles, chacune disposant de ses

⁷ Voir par exemple l'installation "Empreinte Sonore" (V. Drouin-Trempe et J.P. Côté, 2022) qui reprend explicitement de *Point d'Origine* l'idée d'un son qui s'inscrit dans l'espace et ne s'entend que par le biais d'un déplacement.

⁸ « Écouter l'Origine » (N. Reeves, D. St-Onge & A. Bouchard), en cours de développement à l'église montréalaise du Très-Saint-Nom-de-Jésus, à venir 2026.

propres modalités d'évaluation, n'est pas la moindre des difficultés auxquelles se heurte ce domaine encore en devenir : les créateurs-chercheurs travaillent sans filet, sans rien qui puisse laisser présager de la façon dont les œuvres seront reçues.

Pour revenir aux premiers commentaires du présent article, comme pour bien des créateurs, la question de savoir dans quelle catégorie ou dans quel domaine se situent notre démarche ne fait pas partie de nos préoccupations. Elle intervient parfois lors de symposiums ou de colloques, nous incitant alors à poser un regard rétroactif sur notre parcours ; mais il n'est jamais arrivé que nous amorcions un projet à partir d'une volonté explicite de nous positionner comme protagonistes de la recherche-création. Toutefois, en contemplant *a posteriori* le chemin parcouru, avec pour compagnons et compagnes de création la quarantaine de personnes qui, pendant des années, ont œuvré à la réussite de nos entreprises, chacune en leur temps et en fonction de leur expertise, il ne nous semble pas illégitime de supposer que nos pratiques relèvent, au moins partiellement, de ce domaine. Nous serions heureux qu'elles puissent contribuer à en clarifier la définition.

Une telle affirmation ouvre naturellement des questionnements qui restent, et resteront longtemps encore, ouverts à la discussion et à l'échange. Ancrés dans les expériences et les méthodologies que nous avons développées, et qui, recensées dans plusieurs articles, sont maintenant partagées, ils servent de socle implicite au développement de nos projets actuels et futurs et s'ajoutent aux démarches de tous les artistes qui, jour après jour, précisent les limites par lesquelles ce concept extrêmement prometteur qu'est la recherche-création tente depuis bientôt quatre décennies de se positionner.



Figure 19. Extrémité d'une lanterne Harmonique. Les seuls détails qui apparaissent sont les deux vis de fixation et le connecteur de charge, disposés de façon à évoquer un visage de batracien à l'état larvaire.

Bibliographie

- [BRY 07] BRYANT S., CAILLOU J-S., HOFBAUER D., PONSOT P., « Le château de Chambord (Loir-et-Cher) – Un monument trop (peu) regardé », *Medieval Europe, 4^e congrès international d'archéologie médiévale et moderne*, 2007, disponible en ligne, <https://www.chambord-archeo.com/wp-content/uploads/2017/12/CHAMBORD-Bryant-Caillou-Hofbauer-Ponsot-2007.pdf>.
- [CAO 19] CAO Y., ST-ONGE D., BELTRAME G., « Collaborative tracking of devices in historical architecture », *Colloque annuel ReSMiQ* (Montréal, QC, Canada), 2019, disponible en ligne, <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/18996/1/St-Onge> ; consulté 16/08/2025
- [REE 17] REEVES N., ST-ONGE D., BRÈCHES P-Y., « Origin Point : Harmonic Echoes of a Stone Cosmology », proceedings of the Generative Arts XXth conference, p. 288-319, Domus Argenia (Rome), 2017
- [REE 19] REEVES N., From the Harmony of the Spheres to Spherical Harmonics: The Potential of Wave-Based Morphogenetic Processes for Musical and Architectural Composition, Thèse de doctorat, Université de Plymouth (U.K.), 2019, disponible en ligne, <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/18996>
- [REE 20] REEVES N., « Échos harmoniques d'une cosmologie de pierre », in *Les changements d'échelles: les arts et la théorie confrontés au réel*, p. 377-420, Mimesis, Nancy (Fr) 2020
- [TAN 92] TANAKA H., « Leonardo da Vinci, Architect of Chambord? », dans *Artibus et Historiae*, vol. 13, no 25, p. 85-102, IRSN s.c., Cracovie (Pologne), 1992

[VER 92] VERDET J-P., « La diffusion de l'héliocentrisme », *Revue d'histoire des sciences*, 1989, tome 42, No, 3 pp. 241-253, Presses Universitaires de France,, Paris. 1989

[VAR 11 ZARA V., « Signatura rerum : Le langage symbolique et musical dans l'architecture de Castel del Monte », dans *Châteaux et Mesures : actes des 17es journées de castellologie de Bourgogne*, Édition du CeCaB, Ciry-le-Noble, 2011

Illustrations

Fig.1 : Nicolas Reeves, NXI Gestatio

Fig. 2 : Yoanna Anastassova, NXI Gestatio

Fig. 3, 4, 5, 6 : Nicolas Reeves, NXI Gestatio

Fig. 7 : Yoanna Anastassova, NXI Gestatio

Fig. 8 : Domaine public. Photo originale : Services commerciaux des bâtiments de France.

Fig. 9 : Nicolas Reeves, NXI Gestatio

Fig.10 : À gauche, Stefano Gatti, Pexels ; à droite : domaine public.

Fig. 11, 12, 13 : Guillaume Crédoz, BitsToAtoms

Fig. 14, 15 : Pierre-Yves Brèches, NXI Gestatio

Fig.16 : Nicolas Reeves, NXI Gestatio

Fig. 17 : Yoanna Anastassova, NXI Gestatio

Fig.18 : Nicolas Reeves, NXI Gestatio

Fig.19 : Nicolas Reeves, NXI Gestatio