

Arts et sciences, des voies proches

Sciences and arts, close paths

Jean-Claude Serge Lévy¹

¹ MPQ UMR 7162 CNRS UPC jean-claude.levy@univ-paris-diderot.fr

RÉSUMÉ. Quelques exemples montrent la proximité des arts et des sciences, même s'il faut parfois des centaines d'années pour établir le lien par exemple entre pavage et structure du solide. Une approche historique globale permet d'observer cette distance variable au cours du temps et des thèmes, de la préhistoire à nos jours. Enfin on se rend compte ici de l'effet du succès de l'opéra dans l'évolution de la musique au XIXe siècle et on réfléchit à une salle de concert optimale avant de s'interroger sur l'avenir de cette distance.

ABSTRACT. Some examples of common topics in arts and sciences are shown. But the connections between them can take centuries as for tiling and solid structures. A global historical approach enables us to estimate this variable distance from prehistory to nowadays. The part of opera in musical evolution in the nineteenth century is evidenced and the search for an optimal concert hall is introduced before asking about the future of this distance.

MOTS-CLÉS. Pavages, agrégats, quasicristaux, alliages à forte entropie, art islamique, lointains bleutés, optimisation, salle de concert, histoire globale.

KEYWORDS. Tiling, clusters, quasicrystals, high entropy alloys, Islamic art, light scattering, optimization, concert hall, global history.

1. Introduction

Les arts et les sciences ont la même origine : l'observation du monde environnant. Ils consistent tous deux en la traduction de cette observation en des documents, des interprétations, accessibles aux autres membres de la communauté. Cette proximité évidente des deux activités les lie étroitement. La différenciation entre art et science provient d'ailleurs. Cette différenciation s'effectue dans les constructions sociales qui déterminent ces activités. En effet, dans la société, les finalités de ces activités, arts ou sciences, ne sont pas tout à fait de même nature.

Une réalisation artistique est appréciée de la communauté des proches par son côté esthétique, sa puissance évocatrice pour chacun, ou pour sa singularité, sa force d'expression, tandis qu'une œuvre scientifique se juge sur sa capacité à interpréter le réel, voire sur sa potentielle application à de réelles réalisations, et du coup sur le principe de son efficacité pratique jugée par une communauté d'experts. Karl Popper propose même de mesurer la valeur scientifique en quantifiant le nombre de propositions qu'elle renverse¹. Dans le cas d'une œuvre d'art, le jugement de la collectivité « artistique » ou d'une fraction de cette collectivité est essentiel à son appréciation. L'art est donc profondément inséré dans la société. Dans le cas du travail scientifique, c'est l'adéquation pratique à la réalisation concrète de cette théorisation qui est essentielle, même si le jugement de la collectivité scientifique, les « pairs », est crucial. Autrement dit, l'abstraction est donc grande du côté scientifique, tandis que le charme, ou plus généralement la puissance de l'expression, est important du côté artistique. Ce sont des différences de nuances, mais des siècles, des millénaires de pratique ont enraciné et développé ces différences dans le quotidien des artistes et des scientifiques. Finalement ces différences ont séparé, clivé ces milieux

¹ Karl Popper (1902-1994), philosophe des sciences, a introduit le principe de falsifiabilité d'une théorie, ce qui, *a contrario*, mesure l'importance théorique d'un travail scientifique.

sociaux. Et ces différenciations, ces clivages se sont multipliés à toutes les échelles à l'intérieur de ces disciplines de telle sorte que l'union des sciences et des arts paraît maintenant bien improbable.

Cette première remarque nous ouvre aussi une piste d'étude, de comparaison des arts et des sciences, celle de l'histoire de ces deux voies si proches, mais si différentes. Nous allons donc parcourir cette histoire à grands pas en profitant des méthodes simplificatrices de l'histoire « globale ». Cette méthode bien rodée et illustrée par Fernand Braudel² et ses nombreux collaborateurs évite le détail en recherchant le sens général. Autrement dit nous allons suivre les méandres de cette différenciation progressive entre art et science au cours de l'histoire. Cela nous permettra aussi de considérer quelques cas particuliers d'interaction potentielle entre arts et sciences, comme l'étude des pavages du plan et de l'espace, -que nous mettrons en parallèle avec la structure intime des solides et la réalisation de matériaux optimaux. De même, nous observerons en détail la conception et la réalisation de spectacles musicaux, en parallèle avec la physique des ondes. Nous verrons ainsi comment la divergence culturelle entre art et science agit dans des cas précis. À l'occasion de cette confrontation nous pourrons aussi apprécier les avantages potentiels d'une mise en commun de ces travaux, une expérience de pensée.

Clairement cette si longue histoire commune entre art et science ne peut qu'avoir accentué les différences entre ces deux perspectives, entre ces deux communautés. C'est évidemment ce que nous allons observer de façon plus précise au cours de cette étude historique. Pourtant la proximité de l'origine commune des sciences et des arts nous fait évidemment éprouver le besoin d'une synthèse, ce qui semble difficile à réaliser mais pas impossible. Clairement, un tel effort de rapprochement, de relance, est un peu le but sous-entendu de l'existence même de cette revue « Arts et Sciences ». Plus précisément l'article récent de Georges Chapouthier³ montre un tel souci de « recollement » entre les expériences différentes initiales, que sont l'art et la science. C'est donc dans cette perspective d'une synthèse difficile mais pas impossible, que nous allons essayer d'œuvrer, en choisissant quelques points d'approche particuliers au cours de ce parcours, tout en reconnaissant d'emblée la difficulté de la tâche.

L'organisation pratique de cet article découle naturellement de cette mise en perspective. Il s'agit donc de suivre l'aventure de l'histoire humaine des sciences et des arts en l'émaillant de l'étude de quelques cas particuliers. Bien entendu la conclusion portera sur les conditions optimales de poursuite, de développement, de ce dialogue entre art et science.

2. Brève histoire du dialogue entre art et science

Comme annoncé plus tôt il s'agit ici de considérer les grandes ères historiques de l'humanité, c'est-à-dire celles de la chasse-cueillette, de l'agriculture-élevage et de l'ère industrielle, voire la suite post-industrielle qui apparaît maintenant. Ce raccourci nous permettra d'aller à l'essentiel et d'observer comment les clivages entre art et science, entre arts et sciences se sont effectués, opèrent et peuvent être dépassés.

2.1. Art et science à l'ère chasse-cueillette

De fait, on n'est pas ici limité aux temps préhistoriques et à l'archéologie puisque jusqu'à des temps encore récents certaines tribus vivaient encore en tant que chasseurs-cueilleurs et sans grande interaction avec le reste de l'humanité. Ainsi la visite de ces tribus par des ethnologues a donné lieu à des

² Fernand Braudel (1902-1985), historien, a développé cette méthode globale dans sa thèse et dans ses ouvrages suivants cités dans la bibliographie. Sa thèse elle-même s'inscrivait dans la perspective de l'École des Annales d'une vue synthétique résultant d'une analyse détaillée.

³ Georges Chapouthier a publié récemment dans Arts et Sciences un témoignage sur son enfance de futur scientifique baigné dans l'art.

observations intéressantes, profondes, in situ, en passant de Malinowski⁴ à Lévi-Strauss⁵ et Clastres⁶. En particulier Clastres a montré que dans le système de vie de ces tribus, il suffisait de consacrer environ trois heures par jour à l'alimentation, l'occupation pratique, pour vivre normalement ce qui laissait beaucoup de temps pour s'adonner à la réflexion et à la création. Cela explique l'abondance et la qualité des œuvres d'art trouvées dans les cavernes et abris préhistoriques, tout comme l'abondance des œuvres des arts premiers ou des arts primitifs si présents dans les musées et les collections.

Pour les sciences, les témoignages de l'activité durant cette ère sont plus indirects, ce n'est que l'observation des restes des outils, mais qui montre quand même une réelle maîtrise, un savoir-faire indiscutable et donc une connaissance approfondie de ces domaines. Et ces outils sont nombreux et variés : armes, arcs, flèches, couteaux, tout comme des instruments de musique dont des flûtes. De plus la maîtrise de techniques artistiques, tout comme celle des différents matériaux colorés utilisés en peinture, ou même la réalisation de feux, témoignent d'un réel savoir.

Les thèmes des peintures de cette ère sont essentiellement des scènes de chasse : des animaux en pleine course. Cet art est bien efficace puisque des artistes comme Picasso se sont même inspirés de sa force expressive. Les sculptures trouvées dans les abris sont celles de petits objets, bijoux ou modèles féminins, Vénus de Lespugue ou de Willendorf, Dame de Brassempouy⁷. On ne trouve guère de représentation des résultats de la cueillette. L'interprétation que l'on peut donner de la raison de ces choix artistiques provient de l'observation générale de la stabilisation des sociétés, une clé de leur survie, un élément essentiel de leur personnalité qui donc marque leur art.

Rappelons que d'une part beaucoup de sociétés anciennes ont disparu, ce qui témoigne d'une profonde instabilité. D'autre part l'existence même de ces groupes, tribus suggère aussi la présence de conflits entre individus, entre sous-groupes, ce qui semble naturel, et donc de potentielles instabilités. Par exemple Lévi-Strauss parle de changement de chef à l'occasion de la croissance d'un groupe, en insistant sur le choix démocratique qui est fait du nouveau chef⁸. Plus généralement Duby et Dumézil⁹ ont repéré dans les sociétés anciennes une répartition tripartite : chevalier, prêtre et tiers état, ce qui donne à la religion un caractère stabilisateur de la société, un recours à une autre dimension essentielle à la survie du groupe. Cette dimension entraîne donc largement les choix artistiques effectués.

En revenant à la création artistique de cette ère ancienne, cette remarque nous conduit directement à concevoir un schéma de religion primitive où les animaux sauvages et la maternité tiennent une grande place. Curieusement, les plantes n'ont pas beaucoup d'importance dans l'imaginaire de ces sociétés, dans leur production artistique, alors qu'elles comptent probablement beaucoup dans l'alimentation, dans le quotidien. C'est le mouvement, la vie, qui a fasciné les artistes de cette époque.

⁴ Bronislaw Malinowski (1884-1942) fut l'un des premiers ethnologues à appliquer les méthodes de l'analyse psychologique à l'étude des sociétés primitives.

⁵ Claude Lévi-Strauss (1908-2009) a étudié aussi les sociétés primitives en partageant leur vie durant de longs séjours.

⁶ Pierre Clastres (1934-1977), un élève de Lévi-Strauss, a aussi vécu au sein de sociétés primitives, notamment celle des indiens Guayaki, et en a rapporté une analyse détaillée.

⁷ De nombreux musées sont consacrés à l'art primitif, comme le musée de l'Homme à Paris, le musée du Quai Branly- Jacques Chirac à Paris, le Musée d'Archéologie nationale à Saint-Germain en Laye, le musée de l'Aurignacien à Aurignac et Nestploria, le centre numérique et préhistorique Aventignan.

⁸ C'est dans *Tristes tropiques* que Claude Lévi-Strauss parle de ce changement délicat de chef de tribu.

⁹ Georges Duby (1919-1996) a ainsi publié *Les trois ordres ou l'imaginaire du féodalisme*, Gallimard (1978) et *Le chevalier, la Femme et le Prêtre : le mariage dans la France féodale*, Hachette (1978). Georges Dumézil (1898-1986) a publié *L'idéologie tripartite des Indo-Européens*, Latomus (1958).

2.2. Art et science à l'ère agriculture-élevage

La transition vers l'ère agriculture-élevage est loin d'avoir eu lieu de façon uniforme dans le temps et dans l'espace. Cette transition a été évidemment favorisée par la présence de sols riches, bien arrosés régulièrement, et aussi par le bénéfice d'un climat favorable à la présence humaine. C'est un ensemble de conditions finalement assez rares. Ainsi cette transition s'est développée rapidement en Chine, en Mésopotamie, en Égypte notamment, comme au Pérou avec la civilisation Caral. Cette nouvelle ère a conduit alors à pratiquer un habitat sédentaire, marqué par le rythme des saisons et des activités de l'agriculture : préparation des sols, semailles, entretien et récolte. Cet habitat permanent et le nécessaire stockage des produits ont imposé la réalisation de constructions en dur, des hameaux, des villages. L'échange des produits, des outils, des services avec les voisins a conduit à la réalisation puis à l'entretien de chemins. Bref, toute une nouvelle structure urbanisée apparaît alors, comme Ibn Khaldoun¹⁰ l'a noté très tôt. C'est tout un nouveau mode de vie qui apparaît de façon cohérente dans ces régions, entourées par un habitat nomade correspondant à l'ère précédente.

La construction en matériaux solides d'un habitat permanent entraîne avec elle de nouveaux problèmes techniques, scientifiques et aussi artistiques, car les habitants veulent aussi personnaliser leur mode de vie, donner une touche personnelle à leur lieu de vie. Un premier défi vite relevé par ces nouveaux architectes est celui de la construction de bâtiments de grande taille, évidemment des bâtiments d'intérêt collectif destinés à impressionner les voisins, à signer et signaler leur présence. Assez curieusement, de tels grands bâtiments de forme pyramidale apparaissent ainsi en Égypte et en pays inca à peu près simultanément. Le choix de cette forme particulière s'explique probablement par sa stabilité, sa résistance à l'épreuve des événements climatiques. C'est aussi la forme naturelle de dunes et de volcans. Mais la masse de matériaux nécessaire à la réalisation de ces pyramides est énorme ! Cette masse impose donc un réel défi à la recherche scientifique et technique précise de ce temps pour réaliser de telles grandes structures : trouver des matériaux de grande taille et de bonne qualité et les transporter à la place choisie.

La peinture trouvée dans la tombe *Djéhoutyhotep* à *Deir El-Bercha* en Égypte donne un aperçu de la technique utilisée pour le transport de charges. Si cette tombe date de 1800 avant J.C., sa découverte à l'ère moderne remonte, quant à elle, au début du dix-neuvième siècle. Depuis, l'observation de cette peinture a suscité de multiples réflexions et recherches sur les techniques utilisées pour transporter de telles masses de matériaux. En effet cette fameuse peinture représente la statue d'un colosse, une énorme statue, reposant sur un traîneau tiré par une quantité impressionnante d'ouvriers, alors qu'un membre de l'équipe, à l'avant de ce traîneau, verse un liquide, probablement de l'eau, sur le sol. L'interprétation scientifique de ce geste technique n'est que très récente car les archéologues y voyaient un geste religieux. En l'analysant, Daniel Bonn et ses collaborateurs¹¹ ont ainsi suscité un intérêt exceptionnel dans le monde entier. L'explication trouvée réside dans l'abaissement spectaculaire et bref du coefficient de frottement lors de cette opération de mouillage du sable, ce qui diminue au moins de moitié l'effort nécessaire pour tirer le traîneau. Autrement dit, la réalisation de ce geste signe une maîtrise scientifique et technique considérable, une maîtrise qui reste encore significative de nos jours, puisqu'elle vient enfin d'être comprise à la suite d'une vérification expérimentale minutieuse ! Évidemment une telle optimisation du transport de lourds blocs était une condition clé pour que de telles réalisations, si nombreuses en fait, voient le jour. Elle témoigne d'une avancée spectaculaire.

Les exploits des architectes et de leurs collaborateurs ne se sont pas arrêtés là. Sûrs de leurs techniques, ils ont construit par exemple le phare d'Alexandrie et aussi de nombreux temples aux dimensions

¹⁰ Ibn Khaldoun (1332-1406) est considéré comme le précurseur de la sociologie et de la démographie moderne. Ainsi dans *Histoire du monde au XVe siècle*, Gabriel Martinez-Gros consacre un chapitre au *Livre des exemples*, son œuvre maîtresse.

¹¹ Daniel Bonn et son équipe ont publié en 2014 un article dans *Physical Review Letters* à propos de la modification du coefficient de frottement du sable lors de son humidification. Cet article a eu un retentissement international avec des articles dans *The Washington Post* et *The Huffington Post* notamment.

imposantes. De tels travaux impliquaient de grandes équipes, durant de très longues durées, des essais et des erreurs. La réalisation précise de ces plans nécessitait donc pour les nombreux acteurs de ces constructions une communication écrite ou dessinée, de façon à bien enregistrer ces plans et à noter les étapes de leur réalisation. Là aussi, dans tous ces lieux de construction avancée, en Égypte comme en pays inca, on a trouvé les traces d'une telle communication iconographique.

Ces textes ou dessins comprenaient initialement beaucoup de signes et exigeaient donc des lecteurs-écrivains savants, des scribes, pour les écrire et les lire. En général, dans ces pays à la pointe du développement de l'époque, ces écritures iconographiques comme les hiéroglyphes se sont transformées assez vite en une forme phonétique économique, plus limitée en nombre de signes, plus facile à pratiquer lors de l'écriture comme lors de la lecture¹². La Chine fut une exception négative pour cette transition. Cette nouvelle écriture correspondait au langage oral commun et exigeait donc moins de connaissances spécialisées du lecteur. Elle devenait donc accessible à un grand nombre de petits lettrés. Cette invention de l'écriture est encore une fois la trace d'activités à la fois techniques, scientifiques en quelque sorte, et aussi artistiques. Le moteur de la recherche de ces innovations était la nécessité, une fois que l'on avait admis le principe de telles réalisations. Du coup, un nouveau pas dans l'art et la culture était franchi et avec la récente acquisition de l'écriture, la littérature allait bientôt apparaître, avec toutes ses possibilités.

Les temples ainsi réalisés étaient voués à un polythéisme qui correspondait aux nombreux éléments vitaux présents dans le quotidien de ces pays. La décoration de ces édifices religieux a rapidement progressé et s'est enrichie peu à peu d'un vaste vocabulaire. Aux temples égyptiens énormes et massifs décorés de hiéroglyphes ont succédé des temples grecs doriques, ioniens et corinthiens où la décoration florale a vite pris une large place, à la suite des lotus et papyrus égyptiens, signant ainsi une version plus statique et plus complète de l'imaginaire que celle de l'ère chasse-cueillette. Ces nouveaux styles se sont développés particulièrement en Grèce et ont été rapidement disséminés dans tout le monde connu. Leurs qualités esthétiques ont largement séduit les visiteurs. Bien plus tard, l'architecte vénitien Palladio reprendra ces thèmes de construction, ces frontons avec un très large succès permanent et une longue influence, en particulier sur le monde anglo-saxon, de la cathédrale Saint-Paul à Londres, à la Maison Blanche à Washington¹³.

Les nombreux petits sites de la Grèce sont ainsi devenus de hauts lieux de culture. Pour expliquer cette sorte de transition de l'Égypte à la Grèce et l'émergence de nombreuses villes grecques comme des hauts lieux de civilisation, on peut penser que le caractère escarpé de la Grèce avec ses vallées profondes favorisait la présence de tels lieux refuges dans un monde devenu très compétitif, très guerrier. En ce sens le succès culturel de la Grèce serait dû à ses places stratégiques. Ce succès guerrier est aussi confirmé par la présence en Grèce d'une grande quantité d'esclaves, un résultat des nombreuses campagnes militaires. Grâce à cette servitude, les citoyens athéniens, libérés de toute contrainte domestique, pouvaient se consacrer totalement à la réflexion. Cela a vraisemblablement mené au « Siècle d'or athénien » et à ses multiples succès scientifiques et artistiques, en assimilant ici la philosophie à une activité scientifique. Ce fut une époque de progrès considérables en de nombreux domaines. Cette époque marque encore l'humanité. De fait ce siècle d'or athénien est longtemps apparu comme un sommet insurpassable de la réflexion à la fois scientifique et artistique.

À l'étape suivante de ce raccourci historique, Rome a su profiter de l'héritage culturel grec en y ajoutant un sens pratique très développé : des domaines agricoles optimisés, les villas, des armées régulières très entraînées, les légions, un réseau de routes et de circulation d'eau adapté à la taille de l'empire. Le tout avec une gestion souple du lien social, les religions locales. Cette nouvelle structure,

¹² En 1982 l'exposition « Naissance de l'écriture : cunéiformes et hiéroglyphes » aux Galeries nationales du Grand Palais a eu une large audience. Jean-Paul Boulanger et Geneviève Renisio en étaient les commissaires, Béatrice André-Lecknam et Christiane Ziegler les auteures du catalogue. Cette exposition a suscité un vif intérêt pour cette transition au-delà de ces pays.

¹³ De nombreux volumes ont été consacrés à l'œuvre de l'architecte Palladio et à son rayonnement exceptionnel, dont celui de James S. Ackerman *Palladio*. Citons ici l'ouvrage plus général de Michelangelo Muraro, *Civilisation des villas vénitiennes*, Éditions Place des Victoires (2007).

enracinée dans le concret, a donné à l'Empire romain une longévité exceptionnelle – des siècles – et une extension géographique tout aussi exceptionnelle. Ensuite le déclin progressif de cet Empire fut marqué d'une part par le déploiement de l'église catholique, monothéiste et donc porteuse d'une certaine image du pouvoir central, et d'autre part par des mouvements d'invasion de diverses origines. Bientôt l'émergence de l'islam, une autre religion monothéiste, accentua la compétition dans différents domaines.

Pour en revenir à notre thème, arts et sciences, il faut souligner que les luttes d'influence entre différentes formes de religions monothéistes ont longtemps figé l'activité scientifique en Occident, à la fois par la polarisation de la réflexion sur des thèmes religieux et aussi finalement par respect pour la science des anciens, des Grecs en l'occurrence, ce qui a figé les connaissances. D'autre part, l'art, quant à lui, est alors aussi dominé par le monde religieux en plein essor, avec, par exemple, la construction d'églises romanes d'un type assez traditionnel issu de la Rome antique. Cette construction se répand longtemps et à une large échelle. Un point particulièrement intéressant dans l'esprit de cette étude est le développement parallèle de l'art islamique dans les régions marquées par l'islam.

L'art islamique est plus ou moins marqué par la volonté d'absence de représentations humaines, animales ou végétales. Cette intention, avec ses nuances locales, correspond à un désir évident d'abstraction. Et cette abstraction a conduit à une étude savante très poussée dont nous n'avons pas fini d'apprécier la qualité et le potentiel scientifique, même dans l'art.

Le point de départ de cette recherche dans les réalisations artistiques du monde musulman est tout simple, presque incontournable : la réalisation de pavages pour décorer un panneau, un plan. C'est la réflexion sur l'assemblage des formes. Par exemple pour réaliser un mur en pierres sèches, il faut récupérer des pierres, les tailler et enfin les assembler, une besogne de base effectuée depuis les débuts de l'humanité. Avec un langage plus sophistiqué pour décrire ces opérations, on peut parler de mur cyclopéen et en étant plus précis, de mur polygonal avec des références au mur polygonal de Mycènes (dont la partie la plus ancienne date du quatorzième siècle avant J.C.) ou au mur polygonal qui sert d'assise au temple d'Apollon à Delphes (ce mur date du sixième siècle avant J.C.). C'est le principe de polygones qui s'emboîtent pour remplir le plan. Ici entre les pierres, on peut aussi observer des polygones vides.

Ainsi les artistes de l'art islamique ont vite considéré l'assemblage de polygones réguliers de différentes symétries, en tirant avantage de la régularité introduite par ces symétries, une idée qui s'est avérée très fructueuse, pour réaliser des assemblages de grandes dimensions. À partir de dessins, ils ont réalisé des pavages en mosaïque ou en pierre. Ces pavages ont vite été répandus dans tout le monde islamique comme on peut le constater. Le tour de force scientifique des artistes de l'art islamo-andalou est d'avoir découvert tous les 17 pavages du plan dont la symétrie est cristalline. Cette découverte a été probablement le résultat d'une suite d'essais erreurs. Elle témoigne d'une forte détermination car elle nécessite beaucoup d'essais et aussi beaucoup d'imagination.

Le résultat de ces réalisations est une évidence de la proximité entre science et art. Ainsi à l'Alhambra de Grenade, comme l'a noté le mathématicien Marcel Berger¹⁴, ces artistes ont multiplié des œuvres superbes de belle qualité mathématique. Ces constructions de Grenade sont bien sûr antérieures à 1492, donc bien avant que la notion de symétrie cristalline ne soit même formulée, et elles illuminent. Mieux, les artistes de l'art islamo-andalou ont aussi construit des pavages de symétrie d'ordre 5, des pavages de symétrie d'ordre 8, et des pavages de symétrie d'ordre 12, là aussi bien avant que les symétries quasi cristallines qui correspondent à ces symétries ne soient imaginées actives dans la nature et ne soient finalement observées. Encore mieux, ces artistes ont construit des pavages de symétrie d'ordre 7, ce qui

¹⁴ Marcel Berger (1927-2016), notamment directeur de l'Institut des Hautes études scientifiques à Bures sur Yvette, a écrit dans son livre *Géométrie1 : Aussi bien le touriste visitant l'Alhambra à Grenade que le lecteur feuilletant les pages suivantes est conduit à s'intéresser aux figures planes à motifs répétés régulièrement et couvrant tout le plan. En fait les motifs peuvent varier à l'infini mais il n'y a qu'un nombre fini de façon de les reproduire ; précisément 17 façons, ni plus ni moins, et toutes présentes à Grenade.*

n'a pas encore été observé, mais devrait l'être bientôt, comme nous allons le préciser un peu plus loin ! Les premières tentatives de réalisations de ces pavages de symétrie d'ordre 7 datent environ de l'an 1100¹⁵. De fait ces créateurs ont utilisé des propriétés d'autosimilarité, bien avant que des mathématiciens comme B. B. Mandelbrot ne les formulent¹⁶. Comme les exemples donnés dans la note 15 le montrent, ces schémas ont été vite répandus dans tout le monde islamique. Cela témoigne d'une profonde avancée scientifique et artistique à la fois, qui mérite d'être visualisée ici.

Les Figures 1, 2 et 3 donnent des exemples de différents pavages observés à Samarcande en Ouzbékistan, un des nombreux hauts lieux de cet art largement propagé en Asie, en Europe et en Afrique.

La Figure 1 montre le mariage élégant de deux symétries cristallines, l'une d'ordre 4 et l'autre d'ordre 6, le nid d'abeille, une version biologique de cette symétrie. Cette photographie montre une partie de la mosaïque d'un mausolée de la nécropole Shah-i-Zinda, un ensemble de mausolées et de mosquées très riche en chefs-d'œuvre. Les artistes y ont rivalisé d'invention pour produire des pavages originaux pour les tombes. La loi de la concurrence a ses avantages.



Figure 1. Détail de la façade d'un mausolée de la nécropole Shah-i-Zinda à Samarcande. Noter la symétrie d'ordre 6 (nid d'abeille) au centre et la symétrie d'ordre 4 autour.

La Figure 2 montre une partie du pavage de la mosquée Bibi Khanoum, dont le nom est celui de l'épouse de Tamerlan (1320-1405). Ce pavage montre une symétrie d'ordre 5, une symétrie non cristalline. Les traits rouges parallèles ajoutés sur la photo sont entre eux à des distances $m+n\tau$ fois la plus petite de leurs distances, où m et n sont des entiers et où τ est le nombre d'or. Ces rapports simples soulignent la régularité de la structure, bien étudiée et maîtrisée. Le trait bleu est à 72° des traits rouges. Le schéma à droite correspond à la coupe dans un plan orthogonal à un axe de symétrie d'ordre 5 d'un ensemble de sphères de symétrie icosaédrique. L'article¹⁷ d'où est issue cette coupe parut en 1982, deux

¹⁵ Différents auteurs ont recherché les premières traces de ces pavages. C'est le cas de Jay Bonner et Marc Pelletier qui ont publié en 2012 l'article « A 7-fold system for creating Islamic geometric patterns / Historic antecedents » cité dans la bibliographie. D'après leur étude, le premier pavage de cette nature aurait été produit à *Ghazna* en *Afghanistan* vers 1100.

¹⁶Benoît B. Mandelbrot (1924-2010) a introduit la théorie des fractales qui permet de construire des structures complexes autosimilaires utiles pour représenter bien des structures complexes dont les quasi-cristaux. Ces constructions fractales sont un moyen de développer des pavages originaux de symétrie d'ordre 5 comme l'ont montré R. Penrose, R. M. Robinson et B. Grünbaum et G. C. Shephard cités dans la bibliographie. Les fameux triangles autosimilaires de Roger Penrose ont même été cités lorsqu'il a reçu le prix Nobel en 2020.

¹⁷L'article « Amorphous structures : a local analysis » de J.-C. S. Lévy et D. Mercier qui sert de base à ce dessin avait été présenté à la conférence 3 M à Montréal en juillet 1982 et est paru en 1982 dans la revue citée en bibliographie. Il a été complété par l'article « Construction of amorphous structures » paru en janvier 1983 dans *Phys. Rev. B* 27, 1292, des mêmes auteurs qui ont aussi étudié

ans avant la parution du premier article sur l'observation des quasi-cristaux¹⁸ dont la structure est tout à fait semblable et dont les figures de diffraction révèlent ces symétries. On remarque donc la grande ressemblance entre le dessin de ce sol pavé et la coupe de cet assemblage de sphères, avec notamment les mêmes rapports entre les distances remarquables, une propriété algébrique singulière.

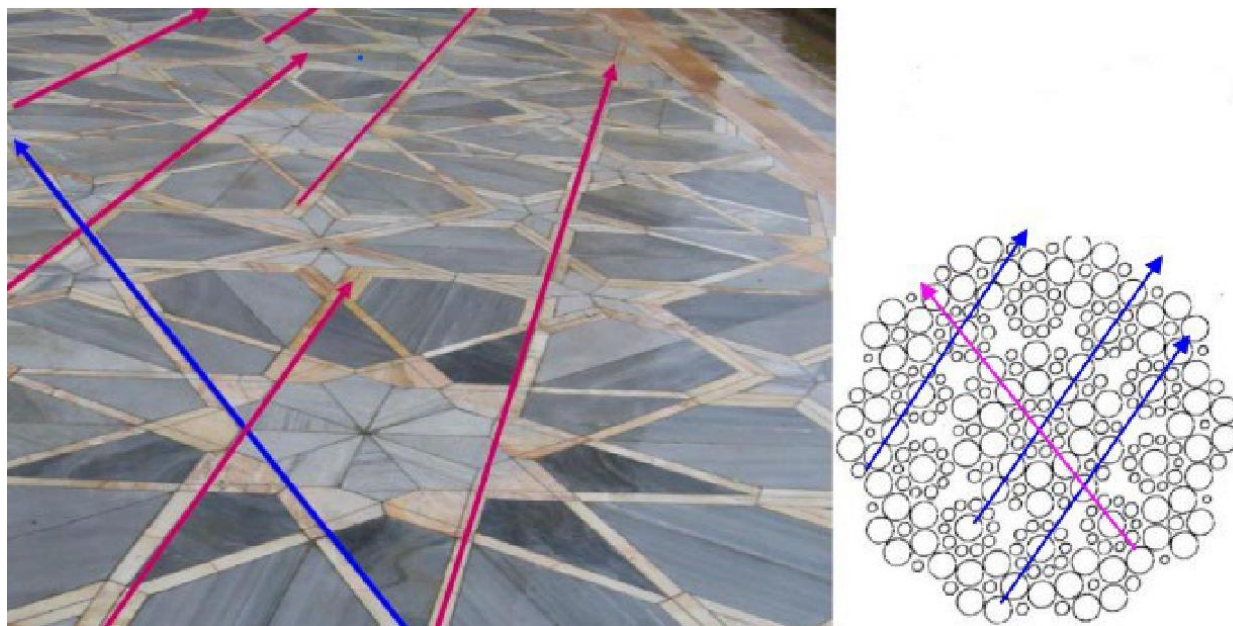


Figure 2. Une partie du pavage du sol de la mosquée Bibi Khanoum à Samarcande (Ouzbékistan). On remarque la symétrie d'ordre 10 de l'ensemble soulignée par les traits parallèles rouges et le trait bleu à 60° . On compare à droite avec la coupe d'un agrégat à symétrie icosaédrique, coupe perpendiculaire à un axe d'ordre 5 (cf. note 17).

Enfin, la Figure 3 montre un détail de la mosaïque du fronton du mausolée Khodja-Akhmad (achevé vers 1350) qui se trouve aussi dans la superbe nécropole Shah-i-Zinda. Cette mosaïque montre l'effort du célèbre mosaïste Fakhr Ali pour construire un pavage de symétrie d'ordre 7, avec les centres d'heptagones réguliers pointés par des flèches bleues, tandis que la cohérence de l'ensemble est maintenue par la présence d'octogones réguliers dont les centres sont pointés par des flèches rouges. Pour l'instant, on ne connaît pas encore d'analogue naturel de cette structure. L'art est souvent tellement en avance sur la science !

Motivés à la fois par ces représentations multiples et par les résultats récents et assez parallèles des mathématiques (fractales) et de la physique, quelques auteurs, dont ceux cités dans la note 15 se sont plongés dans une étude systématique de l'art islamique dès ses débuts et ont ainsi pu dater les premières apparitions de ces figures pleines de symétrie. Elles sont assurément très anciennes.

les propriétés élastiques de tels agrégats dans : « Local elasticity properties of an amorphous structure : evidences for typical sites and shell structure : Dynamic stability » paru en février 1984 dans *Journal de Physique et le Radium* 45(2).

¹⁸ Le premier article sur ce qui a été ensuite appelé un quasi-cristal s'intitule : « Metallic phase with long range orientational order and no translational symmetry ». Il a été signé par D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias et J.W. Cahn. Le titre précise bien le caractère non cristallin de ce matériau et ses propriétés étendues de symétrie. Il est paru en 1984. D. Shechtman a reçu le prix Nobel de Physique en 2011 pour cette découverte. Peu après la parution de l'article initial, D. Levine et P. J. Steinhardt ont fait paraître, toujours en 1984, l'article « Quasicrystals : a new class of ordered structures » qui a donné son nom à ce matériau ainsi qu'à toute une classe de matériaux dont les symétries sont d'ordre 5, 8 ou 12.

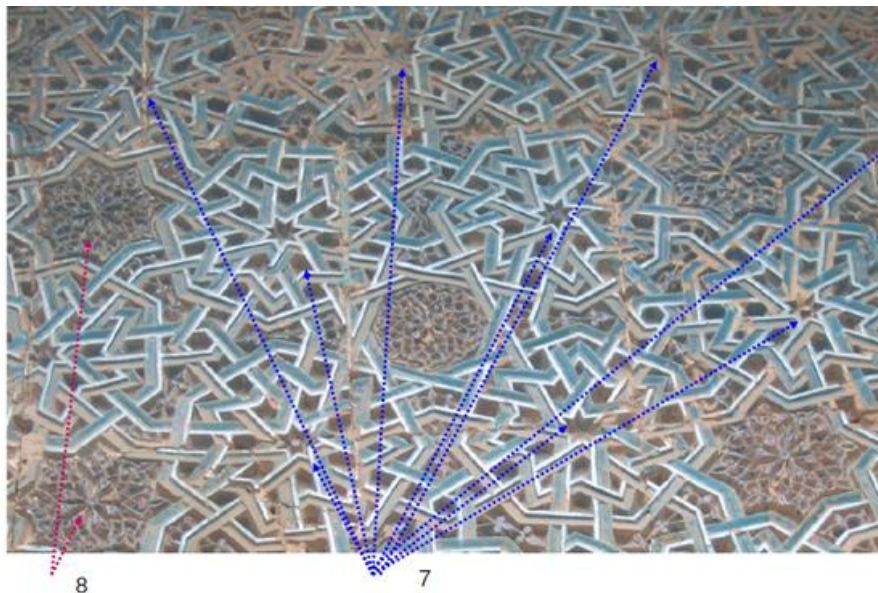


Figure 3. *Détail de la mosaïque du fronton du mausolée Khodja-Akhmad de la nécropole Shah-i-Zinda à Samarcande. On note la présence de plusieurs heptagones réguliers et étoilés pointés par des flèches bleues ainsi que des octogones pointés par des flèches rouges.*

Notons que ces réussites artistiques ont eu une réelle descendance directe, mais largement différée dans l'art moderne avec par exemple les tableaux du peintre néerlandais P. Mondrian (1872-1944) qui sont marqués par le nombre d'or caractéristique de la symétrie d'ordre 5 (1918). L'artiste néerlandais M. C. Escher (1898-1972) resta longtemps à Grenade et est resté imprégné de ces pavages qu'il a su faire siens en les enrichissant d'annotations. À son tour Jean Nouvel, qui avait déjà produit à Paris la structure complexe des moucharabiehs de l'Institut du monde arabe, a su jouer les « paveurs » sur la « Philharmonie de Paris » en y reprenant les thèmes chers à Escher. Escher avait, quant à lui, su ajouter une figuration issue du monde animal et variable à la rigueur mathématique des pavages de l'art islamique et Jean Nouvel s'est bien servi de cette inspiration.

En un certain sens, ce jeu du pavage qui se situe entre science, technique et architecture s'est encore étendu avec le logiciel Catia, issu de Dassault industries, c'est-à-dire des techniques de l'aviation. Ce logiciel adapté au pavage par des surfaces courbes de profils d'avion mécaniquement stables a été ensuite largement utilisé en architecture pour concevoir le plan de la fondation Louis Vuitton établi par Frank Gehry, tout comme les constructions complexes de Zaha Hadid ¹⁹ (1950-2016), dont la tour CMA à Marseille.

Nous allons donc discuter brièvement de la correspondance entre les constructions artistiques à base de polygones et les assemblages d'atomes quand ces assemblages atteignent cette fois des tailles macroscopiques. Sautons donc encore une fois quelques siècles pour réfléchir aux assemblages d'atomes dont les structures mettent aussi en évidence de telles symétries. Pour cela, nous suivrons deux approches parallèles, l'une théorique et l'autre expérimentale. Pour chacune de ces approches, on a évidemment différents niveaux, soit historiques, soit de précision, de spécialisation. Commençons donc par une approche théorique. De toute façon, nous cherchons ici une interprétation simple, la plus synthétique possible.

¹⁹ L'exposition « Zaha Hadid, une architecture » a été présentée à l'Institut du monde arabe en 2011.

Pour un petit ensemble monoatomique, l'icosaèdre plein est optimal si l'unité de base, l'atome est assez souple, car l'icosaèdre et son dual, le dodécaèdre, tous deux bien connus depuis Platon²⁰, sont une même forme plus symétrique (comme celle utilisée dans la réalisation pratique de beaucoup de ballons de football) que les versions cubiques qui, elles, correspondent à des structures cristallines. L'icosaèdre de 13 atomes, 12 à l'extérieur et un au centre est donc plus dense (si l'atome est assez souple pour supporter la compression au centre et l'extension à l'extérieur) que les versions de cette taille à symétrie cristalline. D'où les paramètres atomiques les plus simples pour caractériser les atomes : la taille et la rigidité (ou souplesse)²¹. On perçoit donc alors la probabilité d'une transition lors de la croissance de ces assemblages, entre de très petits agrégats plutôt icosaédriques et finalement des solides plus abondants en matière et donc stabilisés par une structure cristalline et sa régularité²². On conçoit de même le déplacement de la position de cette transition en fonction de la taille de l'agrégat selon la nature du matériau atomique, plus exactement selon la souplesse de l'atome considéré. C'est une transition fréquemment observée par exemple dans des modélisations, tout comme dans la nature. Évidemment en associant des éléments de différentes tailles et de différentes souplesses, on accroît les possibilités d'obtenir des arrangements originaux.

Passons à l'expérience, la nouveauté de cette étude consiste donc à s'intéresser à de petites structures, c'est une des conséquences de la remarque théorique précédente. Historiquement, la première application de cette recherche de petites structures a consisté à pratiquer une trempe ultra-rapide sur de très faibles épaisseurs de matériau liquide brutalement refroidies. La mise au point de cette expérience date des années 1960 en Californie²³ et depuis, cette expérience a été largement reproduite. Le résultat a été la préparation de quantité de matériaux nouveaux, en couches minces ou ultra-minces, des matériaux souvent appelés verres métalliques, pour leur plus ou moins grand désordre. Et parmi ces matériaux nouveaux, on a enfin trouvé les « quasi-cristaux ». Les premiers échantillons dont la symétrie est icosaédrique ont été observés en 1982. Le résultat a été publié en 1984, comme mentionné dans la note 18, et bien d'autres échantillons quasi-cristallins ont été étudiés depuis, avec des axes de symétrie d'ordre 8 et 12 comme déjà cité.

Plus récemment, les techniques d'observation et de préparation des matériaux ont été encore améliorées, et l'on prépare donc maintenant des nanostructures où les trois dimensions sont simultanément toutes petites. En mélangeant des produits de natures différentes, on produit alors des « nanostructures à haute entropie », selon la terminologie actuelle²⁴ qui souligne encore une fois le désordre potentiel de ces structures complexes. Là encore la multiplication des expériences et des résultats semble évidente, puisque le nombre d'échantillons ainsi possibles est infini. Un enjeu technologique clair consiste, par exemple, à trouver un alliage optimal à la fois léger et rigide, ce qui

²⁰ Platon a écrit dans le *Timée*, un dialogue encyclopédique, une note sur les cinq polyèdres réguliers inscriptibles dans une sphère, la pyramide à 4 sommets, le cube, l'octaèdre, l'icosaèdre et le dodécaèdre. On attribue cette découverte à Théétète, un mathématicien proche de Socrate et Platon.

²¹ L'utilisation d'un modèle à deux paramètres pour représenter les atomes métalliques est plus simple que l'*Embedded Atom Model* de Daw et Baskes qui contient de nombreux paramètres ajustables dont l'*anharmonicity parameter* qui correspond à l'*atomic stiffness parameter* défini par J.-C. S. Lévy dans un article accessible sur internet. Ce paramètre de rigidité atomique permet une modélisation simple de l'attraction-répulsion entre atomes métalliques.

²² Dans l'article « Structural transitions in clusters », A. Ghazali et J.-C. S. Lévy étudient cette transition pour des atomes plus ou moins rigides.

²³ C'est à Pol Duwez (1907-1984) que l'on doit cette expérience de trempe ultra-rapide dite de « *splat quenching* » qui permet de réaliser des « verres métalliques » à partir de mélanges en fusion.

²⁴ Les alliages à haute entropie contiennent au moins trois constituants en proportions à peu près équivalentes. Un exemple important en est le CrCoNi aux propriétés de résistance et de rigidité tout à fait exceptionnelles. Ce matériau contient d'autres éléments et l'analyse de sa structure expérimentale et par modélisation, révèle qu'il contient de nombreuses parties dont la symétrie est icosaédrique ainsi que R. O. Ritchie et collaborateurs l'ont montré.

serait un espoir pour l'aviation en réduisant la masse de matériau de leur construction et donc la consommation énergétique. Mais peut-être que parmi ces structures nouvelles on trouvera aussi des structures originales comme ces assemblages à symétrie locale heptagonale ? La science rejoindrait encore une fois l'art, après des années de réflexion et d'attente. Ces incertitudes sont un peu le plaisir de l'aventure de la recherche scientifique et sa dose de hasard.

Revenons-en au Moyen Âge, déjà bien avancé. L'art religieux intègre cette fois de nouvelles pratiques architecturales enrichies par la compétition avec les voisins plus ou moins lointains. C'est tout d'abord l'art gothique qui allège considérablement la construction des édifices élevés que sont les églises, en jouant sur la stabilité de l'arc de cercle, dont on démontrera bien plus tard qu'il s'agit d'une structure mécanique optimale dans sa résistance et sa légèreté²⁵. On atteint ainsi pour ces édifices religieux des hauteurs comparables à celles des plus hautes pyramides, sans leur énorme masse. Cette technique évoque aussi des formes végétales déformées par le vent. Cette propriété de biomimétisme résulte aussi de l'optimisation technique qui vient d'être notée et qui est aussi une propriété valable pour les végétaux dont les tiges se courbent sous le vent.

Parmi les formes végétales inspirantes pour l'architecture ainsi libérée de ses traditions, on trouve les bulbes, notamment imités dans les églises orthodoxes et dont la mode s'est propagée très loin. L'œcuménisme règne alors dans les arts, et les dômes orientaux des mosquées sont largement reproduits dans les églises catholiques occidentales comme la basilique Saint Marc de Venise (inaugurée en 1094) ou la cathédrale Saint-Front de Périgueux (1170) ou encore l'église Sainte-Marie de Souillac (1150), voire l'église Saint-Pierre de Chauvigny. L'historien de l'architecture Auguste Choisy²⁶ suppose même que des artisans venus d'Orient ont été employés à ces constructions originales, tout comme d'autres artisans orientaux ont participé en Europe à d'autres activités artistiques telles la poterie et la céramique en apportant leur touche originale. Ces nombreux échanges favoriseront la transition vers la nouvelle ère dont l'ouverture cette fois mondiale va se révéler exceptionnelle.

2.3. Art et science à l'ère industrielle

La transition vers la nouvelle ère est aussi progressive. On a l'habitude de faire débiter cette transition avec la Renaissance et Pétrarque qui a apporté une première marque de liberté de pensée. Le phénomène marquant de cette transition est bien sûr la conquête du « Nouveau Monde ». Cette conquête repose sur la maîtrise de la navigation, une maîtrise initiée par Henri le Navigateur, un prince portugais qui a développé la recherche technique et la réalisation de la « Caravelle ». Cette maîtrise scientifique et technique va, par ses nombreux résultats obtenus peu à peu, complètement chambouler « l'Ancien Monde », par la découverte de nouveaux espaces suivie par l'apport de quantité de produits nouveaux et finalement la mise en question des anciennes théories comme des pratiques traditionnelles²⁷. De là s'ensuit un développement scientifique considérable qui mène par exemple à la construction d'une machine thermique (James Watt 1776), laquelle à son tour conduira définitivement l'humanité vers l'ère industrielle en disposant ainsi à volonté d'énergies considérables disponibles pour toutes sortes de travaux. Nous ne retiendrons ici que quelques fragments historiques choisis pour illustrer le parallèle entre science et art.

Le cas de la peinture, un art où se conjuguent observation et réalisation, est bien sûr significatif. Ainsi, Léonard de Vinci (1452-1519), ce peintre génial, se présente lui-même comme polymathe, c'est-à-dire

²⁵ Pascal Monceau et J.-C. S. Lévy ont montré cette propriété dans l'article « Mono-dimensional effects on elastic and vibrational properties of lacunary networks » publié en janvier 1994 dans *Phys. Rev. B* 49, 1026.

²⁶ Auguste Choisy (1841-1909), inspecteur des Ponts et Chaussées et historien de l'architecture a écrit *Histoire de l'architecture* en deux tomes.

²⁷ Ce grand changement est étudié en détail dans l'ouvrage *Histoire du monde au XVI^e siècle*, un livre collectif rédigé sous la direction de Patrick Boucheron et cité dans la bibliographie.

à la fois scientifique, technicien et artiste. Bien plus tard, Arnold Sommerfeld²⁸, un physicien allemand célèbre, à la première page de son livre *Optics* (1959), cite ces mots de Léonard qualifiant l'optique de « paradis des mathématiciens » et souligne sa finesse d'observation. En effet Léonard de Vinci pratique notamment ce qu'il appelle la « perspective aérienne » qui correspond au dégradé des lointains bleutés et délicats de tableaux comme la « Joconde ». L'origine physique de cette prédominance des tons bleus pour le lointain est la diffusion de la lumière par les petites particules de l'atmosphère. Cette explication a été mise en évidence expérimentalement par Tyndall en 1869. La même explication est aussi valable pour le bleu du ciel. Ce résultat est associé aux travaux théoriques de nombreux physiciens célèbres comme Mie, Stefan et Einstein. Autrement dit, on retrouve encore une fois dans l'art, une très grande anticipation du travail scientifique grâce à la finesse d'observation des artistes qui ont su voir juste.

Un autre cas de figure de dialogue entre art et science est celui de la musique et de l'acoustique, art et science qui sont évidemment très liés. De nombreux sociologues ont écrit que la révolution industrielle en créant de la richesse dans la société, a aussi créé un désir de culture et de musique dans une fraction assez importante de la société²⁹. En particulier, les musiciens ont pu s'affranchir de la tutelle de mécènes particuliers en créant des spectacles musicaux payants. La question de l'amorce de cette transition qui a effectivement affecté la musique et le monde musical est essentielle. Mais la question qui se pose vraiment est : quelle forme de musique a pu susciter un tel engouement pour déclencher, pour amorcer cette transition et supporter les difficultés économiques liées à ce bouleversement, avant d'enchaîner sur une transformation plus complète du monde musical ? La réponse à cette question va évidemment modifier une perspective simpliste.

Ici encore, on a deux réponses. L'une, plutôt théorique, vient d'une analyse du goût, voire de la mode, et l'autre de l'observation pratique de la réalisation de cette transition. Pour la première réponse théorique, G. W. F. Hegel, un grand philosophe vivant à cette époque de transition, a professé que l'art supérieur est celui de l'opéra, puisqu'il fait appel à beaucoup de sens, la vue, l'ouïe et aussi à la réflexion, et donc qu'il est un art synthétique³⁰. Bien plus tard, Aldous Huxley proposera avec humour d'intégrer à ces représentations d'opéra la sensation de l'odorat³¹. Évidemment, à notre époque, la classification entre arts vivants et retransmissions de séquences, est incontournable et a introduit de nouvelles formes d'art comme la photographie et le cinéma.

La suggestion d'Hegel nous incite donc à considérer particulièrement l'ordre des temps d'apparition des salles destinées à la représentation d'opéras, et à le comparer à l'ordre des moments de création d'autres salles de concert. Un premier résultat de cette observation est clair : de nombreuses grandes villes européennes ont construit des salles destinées à des représentations d'opéras, bien avant l'apparition de la machine de Watt. Cela met de côté une transition brutale de la musique et indique le succès de l'opéra comme le facteur économique déterminant.

Ces lieux d'opéra sont par exemple, dans l'ordre des inaugurations : *Duke's theatre* à Londres (1661), le *Royal theatre in Bridges street* à Londres (1663), le *teatro Capronica* à Rome (1670) *l'Oper am Gänsemarkt* à Hambourg (1678), le *teatro Alibert* à Rome (1718), *His Majesty's Theatre* à Londres (1710), le théâtre Royal de Londres aussi appelé *Covent Garden* (1732), le théâtre *San Carlo* de Naples (1737), la *Fenice* de Venise (1751), la *Scala* de Milan (1778), l'opéra *Bolchoï Petrovski* à Moscou (1780), le théâtre *l'Ermitage* à Saint Petersburg (1785), le *Schauspielhaus* de Berlin (1818), l'opéra le *Peletier* à Paris (1821). Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive, mais elle donne aussi une idée de

²⁸ Arnold Sommerfeld (1868-1951), un grand physicien allemand, aurait été nommé 81 fois au prix Nobel, un record !

²⁹ Cette évolution assez brutale de la musique est signalée par Pierre-Michel Menger et par d'autres sociologues de l'art.

³⁰ G. W. F. Hegel (1770-1831) a ainsi classé l'opéra dans son *Esthétique*, un cours donné entre 1818 et 1829, mettant en perspective tous les arts.

³¹ Aldous Huxley (1894-1963) écrivain anglais a ainsi proposé cette diffusion d'odeurs dans *Brave new world*, paru en 1932.

la progression géographique, autrement dit de la propagation de ce phénomène de création de salles d'opéra, pour reprendre un vocabulaire scientifique. Cette propagation, assez lente, souligne un réseau de capitales ou de grands centres interconnectés³². On peut la comparer à la propagation d'autres phénomènes sociaux pour cette complexité spatio-temporelle.

Entre parenthèses, l'originalité des personnages interprétés par des castrats et des contre-ténors a été aussi une cause de succès de l'opéra, et cela depuis le théâtre *San Carlo* de Naples. Enfin, ce démarrage est lent car il s'échelonne selon les pays sur 150 ans. C'est donc aussi une propagation très lente dont le caractère économique est clair car il s'agit d'investissements importants à réaliser. Et le développement de l'opéra apparaît largement antérieur au développement industriel, il correspond plutôt à une aisance économique qui permet de satisfaire un plaisir composite.

Une brève comparaison pour situer l'historique de la création des salles de concert s'impose. On trouve ainsi, classés par ordre chronologique les nouvelles salles : *Hickford's Long Room* à Londres (1713), *Gewandhaus* à Dresden (1768), *Gewandhaus* à Leipzig (1781), salles *Pleyel* à Paris (1830 et 1839), *Musikverein* de Vienne (1870), la Philharmonie de la *Bernburger Strasse* à Berlin (1882), le *Concertgebouw* d'Amsterdam (1888). Cette comparaison montre bien un franc décalage avec les théâtres destinés à l'opéra et aussi une localisation légèrement différente. L'opéra a clairement eu un effet déclencheur dans la propagation de l'engouement pour cette musique spectaculaire. Plus tard, le goût ainsi révélé pour la musique a permis d'ouvrir des salles pour des projets musicaux plus spécifiques.

Ces considérations, en particulier sur la création architecturale de ces salles de spectacle, nous amènent aussi à réfléchir sur les choix précis qui s'imposent dans cette réalisation, dans les choix architecturaux, une partie plus scientifique et technique. Comme salle d'opéra, on accorde le titre de premier « théâtre à l'italienne » au *Teatro Olimpico* (1585) de Vicence conçu par *Andrea Palladio*, le grand architecte déjà cité pour sa transposition de l'art classique hellénistique, et donc un visionnaire confirmé. Le premier théâtre d'opéra public au monde est le *Teatro San Cassiano* à Venise. Il a été inauguré en 1637. Les salles de théâtre conçues pour des opéras ont suivi ce style, une sorte d'immeuble évidé de son centre et doté d'une scène légèrement en pente, alors que les spectateurs occupent plusieurs niveaux de l'immeuble (orchestre, balcon, amphithéâtre, etc.). Le modèle vient de l'Antiquité. Quelle a été l'évolution de ce style ?

La multiplication des salles d'opéra a été grande, sans changement de style notable, si ce n'est la taille. Par exemple, *l'Academy of Music* de 4000 places fut ouverte à New York en 1854, peu après *l'Italian Opera House* ouvert en 1833, toujours à New York. Cette flambée de constructions s'est assez vite arrêtée. Il faut dire que le genre opéra avait atteint rapidement ses limites avec les opéras de Mozart, Verdi et Puccini par exemple. Ainsi le *Chevalier à la Rose*, un petit bijou de Richard Strauss sur un livret de Hugo von Hofmannsthal a été créé en 1911. C'est une réponse très fine au *Mariage de Figaro*, avec une analyse profonde de la société en évolution, qui indique aussi un début de renfermement de ce genre. D'autres spectacles plus populaires se sont développés successivement (opérettes, comédies musicales) mais le genre n'a pas pris un nouvel essor décisif, si ce n'est par la création de salles multi spectacles de grand format. C'est ainsi qu'apparaît naturellement dans cette étude, le troisième partenaire de l'art et la science qu'est l'économie. Et c'est un partenaire exigeant et déterminant.

Avant de s'intéresser spécifiquement à l'architecture optimale pour ces spectacles composites, il faut constater que la musique pure a une audience assez limitée, mais internationale. Le renouvellement des programmes musicaux est lui aussi limité. En revanche, l'apport émotionnel de la musique est universel. Aussi la musique est associée à beaucoup de spectacles dont les films, avec un rôle souvent important : les airs de Wagner dans *Apocalypse Now* (1979) ou la musique d'Anton Karas dans *Le Troisième Homme* (1949) sont inoubliables, tout comme les airs lancinants d'Ennio Morricone dans les nombreux films de

³² Pour comparaison, l'article de Didier Joubert « *The epidemic of collective violence, a manifestation of disorder and complexity* » EPJ WOC 300, 01004 (2024) montre dans un tout autre cas une propagation complexe.

Sergio Leone. Tout cela confère un statut particulier à la musique, un statut universel et singulier à la fois.

Venons-en aux remarques scientifiques sur l'optimisation d'un spectacle visuel et sonore. Le premier point à noter est la propagation rectiligne des ondes sonores et lumineuses, dans le vide. Dans l'air des effets de mirage, c'est-à-dire de propagation non rectiligne, existent mais sont limités dans une salle de spectacle, car les inhomogénéités de température et de pression y sont faibles et les distances de propagation sont limitées. Du coup la solution optimale est une salle sphérique avec les acteurs au centre de la sphère. De fait, les acteurs ne sont pas isotropes et l'émission de son ne l'est pas non plus. L'accès à ce centre de l'édifice pose un problème de même que l'apport d'accessoires. Donc pour trouver une solution réellement optimale, il faut trouver des compromis. Par exemple les acteurs et leurs instruments peuvent bouger sur scène, ce qui rétablirait une isotropie moyenne dans le temps. Le gain dans la proximité entre acteur et spectateur semble quand même assez convaincant pour que l'expérience puisse être tentée. Avant de donner quelques exemples figurés de réalisations possibles, rappelons quelques exemples de procédés analogues déjà utilisés.

Un premier exemple est celui de la chaire à prêcher ou chaire de prêche ou ambon. Le principe de ces mobiliers parfois mobiles consiste à placer le prêcheur à peu près au centre de ses auditeurs, légèrement au-dessus d'eux, en utilisant des dispositifs du genre miroir acoustique pour bien répartir la propagation du son. L'usage de microphones et de haut-parleurs en a actuellement limité la pratique. Les exemples plus récents de salle à peu près sphérique se sont eux, multipliés.

Citons le grand auditorium de Radio France dans la Maison de la Radio à Paris. Cet espace a la forme d'un cylindre et l'orchestre se trouve placé dans un plan assez bas au centre du disque ainsi décrit. Un autre exemple est celui de la Philharmonie de Paris (2015), déjà citée. La forme de ce bâtiment est celle d'un œuf posé à plat. Les acteurs sont aussi dans un plan assez bas, dans une position assez centrale. La Seine Musicale (2017) est une autre variante de ce même dispositif et son architecture est modulable selon les événements. On peut même donner deux autres exemples d'architecture semblable pour un lieu public, cette fois des centres commerciaux anciens, dont la scène est plus ou moins virtuelle. Ce sont Le Bon Marché (1887) et les Galeries Lafayette (1912) à Paris. Les dates d'ouverture sont approximatives car ces sites ont eu une évolution continue. Il faut ajouter que ces centres commerciaux servent accessoirement de lieux de spectacles.

Pour concrétiser ici le projet de salle de spectacle de symétrie à peu près sphérique, nous présentons dans les Figures 4 et 5 deux schémas de salles de spectacle cubiques de contenances respectives 100 et 300 personnes, où les centres sont évidés pour situer la scène. Dans le premier cas, tous les spectateurs sont à moins de cinq mètres de l'acteur principal. Dans le second cas, tous les spectateurs sont à moins de neuf mètres de l'acteur principal ou du conférencier. C'est une intimité exceptionnelle qui permet au spectateur de saisir un chuchotement de l'acteur ! Du coup cela devrait permettre une autre approche du spectacle.

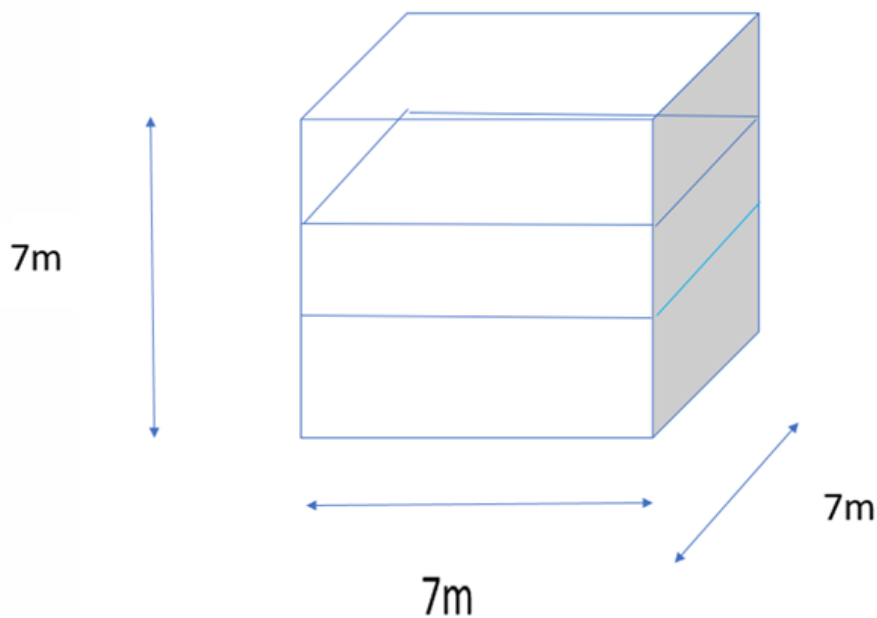


Figure 4. Salle de spectacle pour 100 personnes

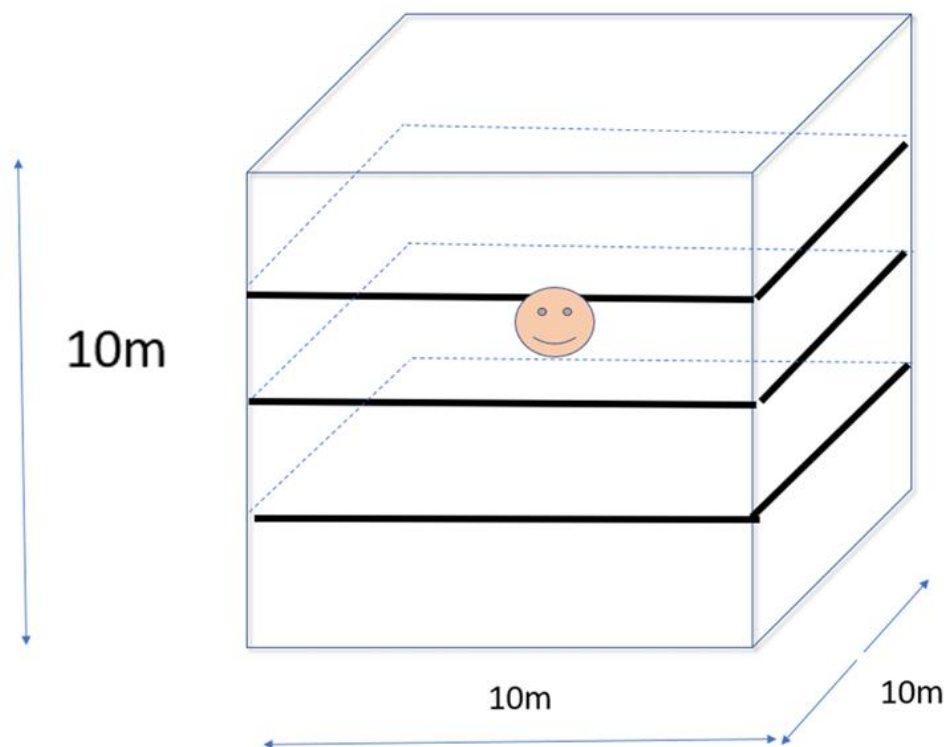


Figure 5. Salle de spectacle pour 300 personnes

3. Conclusion

Après ce bref aperçu de quelques échanges entre art et science, il est temps de conclure. Ces quelques exemples ont montré des convergences réelles, même si les mises en correspondance concrètes peuvent durer des siècles. Initialement, à l'ère chasse-cueillette, l'art et la science fonctionnaient de pair et collaboraient fortement. Le Moyen Âge limite les activités scientifiques pour maintenir un ascendant religieux. Mais la recherche de décors originaux ranime l'activité scientifique et technique. La riposte au harcèlement des Sarrasins s'appuie sur de tels efforts et conduit à son tour à des succès scientifiques sans précédent et à une nouvelle ère. Ces correspondances entre art et science existent et fonctionnent

avec la dynamique commune, c'est-à-dire lentement et d'une façon complexe, au hasard des convergences d'intérêt. La conviction de la réalité de ces convergences et les développements de l'intelligence artificielle, c'est-à-dire des possibilités de synthèse rapide devraient accélérer les avancées parallèles entre art et science.

4. Bibliographie

- [POP 73] POPPER K., *Logique de la découverte scientifique*, Payot, Paris, 1973.
- [BRA 49] BRAUDEL F., *La Méditerranée et le Monde Méditerranéen, à l'époque de Philippe II*, Armand Colin, Paris, 1949.
- [BRA 81] BRAUDEL F., *Civilization and Capitalism 15th-18th Century*, University of California, Berkeley, 1981.
- [BRA 88] BRAUDEL F., *The identity of France*, Harper and Row, New York, 1988.
- [CHA 25] CHAPOUTHIER G., « Témoignage- L'enfance d'un scientifique baigné dans l'art », *Arts et Sciences* n° 9, p. 74-77, 2025.
- [MAL 34] MALINOWSKI B., *Mœurs et coutumes des mélanésien*s, Payot, Paris, 1934.
- [LEV 55] LEVI-STRAUSS C., *Tristes Tropiques*, Plon, Paris, 1955.
- [CLA 72] CLASTRES P., *Chronique des Indiens Guayaki*, Terre Humaine, Plon, 1972.
- [DUB 81] DUBY G., *Le chevalier, la femme et le prêtre*, Hachette, Paris, 1981.
- [DUM 95] DUMEZIL G., *Mythe et Epopée*, Gallimard, Paris, 1995.
- [JOF 79] JOFFROY R., *Musée des Antiquités nationales Saint-Germain-en-Laye Guide*, Éditions Réunion des musées nationaux, Paris, 1979.
- [BON 14] FALL A., WEBER G., PAKPOUR M., LENOIR N., SHAHIZADEH N., FISCINA J., WAGNER C. AND BONN D. "Sliding Friction on Wet and Dry Sand", *Phys. Rev. Lett* n° 112, p. 175502-5, 2014.
- [AND 82] ANDRE-LACKNAM B., et ZIEGLER C. *Naissance de l'écriture*, Éditions Réunion des musées nationaux, Paris, 1982.
- [MUR 07] MURANO M., MARTON P., *Civilisation des villas vénitiennes*, Éditions Place des Victoires, Paris, 2007.
- [MAR 48] MARROU H.I., *Histoire de l'éducation dans l'Antiquité I. Le monde grec*, Éditions du Seuil, Paris, 1948.
- [BER 16] BERGER M., *Géométrie I*, Cassini, Paris, 2016.
- [BON 12] BONNER J., PELLETIER M., "A 7-Fold System for creating Islamic geometric patterns Part 1: Historical Antecedents", *Bridges 2012: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture*, p. 141-148, 2012.
- [MAN 77] MANDELBROT B.B., *Fractals: Form, Chance and Dimension*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1977.
- [GRU 87] GRÜNBAUM B., SHEPHARD, G.C., *Tilings and Patterns*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1987.
- [BON 14] FALL A., WEBER G., PAKPOUR M., LENOIR N., SHAHIZADEH N., FISCINA J., WAGNER C. AND BONN D. "Sliding Friction on Wet and Dry Sand", *Phys. Rev. Lett* n° 112, p. 175502-5, 2014.
- [LEV 82] LEVY J.-C. S., MERCIER D., "Amorphous structures: a local analysis" *J. Appl. Phys.* n° 53, p. 7709-12, 1982.
- [MER 83] MERCIER D., LEVY J.-C. S. « Construction of amorphous structures » *Phys. Rev. B* n° 27, p. 1292-1302, 1983.
- [LEV 84] LEVY J.-C. S., MERCIER D., "Local elasticity properties of an amorphous structure: evidence for typical sites and shell structure. Dynamic stability" *J. Phys. (Paris)* n° 44, p. 291-301, 1984.
- [SHE 84] SHECHTMAN D., BLECH I., GRATIAS, D., CAHN J.W. "Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry", *Phys. Rev. Lett* n° 53, p. 1951-1954, 1984.
- [LEV 84] LEVINE D., STEINHARDT P. J. "Quasi-crystals: a new class of ordered structures", *Phys. Rev. Lett* n° 53, p. 2477-2480, 1984.
- [ZAH 11] ZAHA HADID ARCHITECTS, *Zaha Hadid, une architecture*, Hazan, Paris, 2011.
- [PLA 11] PLATON, *Œuvres complètes (traduction Luc Brisson et al.)*, Cassini, Paris, 2011.
- [LEV 09] LEVY J.-C. S., "Atomic stiffness parameter: A guide for patterning nanostructures", dans LEVY J.-C. S., (dir.), *Nanostructures and their magnetic properties*, p. 1-19 Research Signpost, Trivandrum Kerala India 2009.
- [GHA 97] GHAZALI A., LEVY J.-C. S., "Structural transition in clusters" *Phys. Lett. A* n° 228, p. 291-296, 1997.

- [DUW 60] DUWEZ P., WILLENS R. H., KLEMENT W. Jr, “Continuous series of metastable solid solutions in silver-copper alloys” *J. Appl. Phys.* n° 31, p. 1136-1137, 1960.
- [DIN 18] DING J., ASTA M., RITCHIE R. O., “Melts of CrCoNi-based high-entropy alloys: atomic diffusion and electronic/atomic structure from *ab initio* simulation” *Appl. Phys. Lett. A* n° 113, p. 111902-5, 2018.
- [MON 94] MONCEAU P., LEVY J.-C. S., “Mono-dimensional effects on elastic and vibrational properties of lacunary networks” *Phys. Rev. B* n° 49, p. 1026-1038, 1994.
- [CHO 64] CHOISY A., *Histoire de l'Architecture Tomes 1 et 2*, Éditions Vincent, Fréal & Cie, Paris, 1964.
- [BOU 09] BOUCHERON P., (sous la direction de) *Histoire du monde au XV^e siècle*, Fayard, Paris, 2009.
- [SOM 59] SOMMERFELD A., *Optics*, Academic Press, New York, 1959.
- [MEN 09] MENER P.-M., *Le travail créateur : s'accomplir dans l'incertain*, Éditions du Seuil, Paris, 2009.
- [HEG 97] HEGEL G. W. F., *Esthétique*, Le livre de poche, Paris, 1997.
- [HUX 02] HUXLEY A., *Le meilleur des mondes*, Pocket, Paris, 2002.
- [JOU 24] JOUBERT D., “The epidemic of collective violence, a manifestation of disorder and complexity” *EPJ. Web of Conferences* n° 300, pp. 01004, 2024.