

# Arts et sciences, proximité

## Sciences and arts, closeness

Jean-Claude Serge Lévy<sup>1</sup>

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

**RÉSUMÉ.** Dans une perspective historique des rapports entre arts et sciences, on rappelle d'abord ce qu'est la propagation en physique avant d'approfondir l'histoire des pavages, c'est-à-dire de l'occupation de l'espace, en art comme en science, ce qui démontre de nombreux liens interdisciplinaires à toute époque, de la décoration aux mathématiques, à la physique et la chimie et l'architecture, dans tous les sens. La considération de l'art et la science à l'ère industrielle et notamment les musiques et leurs connexions possibles permet de conclure sur la réalisation de nouvelles voies entre arts et sciences.

**ABSTRACT.** Starting from a global historical view of the links between arts and sciences we first focus on the physical content of propagation, before looking at the long story of tiling and packing in art and science with questions and comments on these numerous links between all disciplines. After looking at the connections between art and science at industrial era, a word on the connections between different musical worlds enables us to conclude about how to improve the paths between arts and sciences in the future.

**MOTS-CLÉS.** Propagation, art de l'islam, quasi-cristaux, agrégats, alliages à forte entropie, taille critique, tenségrité, Street art, alliages à mémoire de forme.

**KEYWORDS.** Propagation, art of islam, quasi-crystals, clusters, high entropy alloys, critical size, tensegrity, Street art, shape memory alloy.

### 1. Introduction

Comme son titre l'indique, cet article s'inscrit dans la suite d'un article récemment paru dans la même revue<sup>1</sup>. Le présent article reprend l'approche d'histoire « globale »<sup>2</sup> de ces distances entre les arts et les sciences, des disciplines nées toutes deux d'une étude approfondie de la nature qui nous entoure, une nature dont nous faisons aussi partie.

Les finalités de ces disciplines sont différentes, les arts sont destinés à l'appréciation d'une communauté d'amateurs, tandis que les sciences ont une visée universelle, pratique ou théorique, sous le contrôle d'experts. Cette différenciation s'est accrue au cours du temps, avec l'accroissement de la population et la structuration de plus en plus complexe de la société<sup>3</sup>. Donc la propagation des idées, à l'intérieur d'une même discipline ou entre disciplines est devenue plus lente, voire problématique, même si les moyens de propagation de tout signal se sont énormément développés. Ce problème de propagation des concepts à travers la société et dans le temps sera donc l'objet d'une première partie,

<sup>1</sup> L'article intitulé « Arts et sciences, des voies proches » est paru dans le volume 9 de la revue Arts et Sciences, aux pages 130-146 en 2025.

<sup>2</sup> La notion d'« histoire globale » a été largement approfondie par Fernand Braudel (1902-1985) qui fut professeur au Collège de France et qui a marqué le développement des sciences humaines en France après la fin de la seconde guerre mondiale. Ses ouvrages principaux sont cités dans la bibliographie.

<sup>3</sup> La complexité de la société « moderne » est particulièrement mise en évidence dans l'ouvrage « La distinction » de Pierre Bourdieu (1930-2002) qui fut aussi professeur au Collège de France. L'ouvrage, cité dans la bibliographie, montre le besoin de se différencier, au-delà des fonctions sociales strictes et le résultat est une mosaïque de personnalités.

avec une réflexion formelle et quelques exemples concrets qui montrent la diversité et la complexité de ces phénomènes.

Dans l'article précédent, le problème des pavages, de l'occupation de l'espace, s'est révélé être un problème central de cet interface entre art et science car il concerne de nombreuses formes de structuration. Il reste ici à développer cette étude, d'une part sur un plan théorique : savoir quelles sont toutes les conséquences d'un changement de structuration d'un groupe lors de sa croissance et ceci qu'il soit constitué de nucléons interagissants, d'atomes ou d'êtres humains ou d'animaux ? Dans le cas de la physique cette réflexion signifie toujours l'espoir de trouver de nouveaux matériaux mieux adaptés par leur structure à de nouveaux emplois. C'est la perspective d'une recherche permanente, d'une dynamique renouvelée qui s'ouvre. Sur le plan de la pratique artistique, la question qui se pose est : comment ces modèles de pavage ont évolué au cours de l'histoire et se sont toujours adaptés aux problématiques du moment ? Ces deux questions de dynamique sont l'objet de la deuxième partie. Elles nous montreront le profond entrelacement des arts et des sciences dans leur actualité au point, un exemple parmi tant d'autres, de donner le nom d'un artiste et architecte (Fuller) à des agrégats de carbone ainsi nommés fullerènes. Ces observations largement reconnues ont valu à leurs découvreurs le prix Nobel de chimie.

La troisième partie est consacrée à la connexion entre l'art et la science à l'ère industrielle, et notamment à la musique, un art si scientifique.

La quatrième partie pose la question de l'animation présente et à venir de ces liens entre arts et sciences en considérant trois cas types de situations actuelles qui se situent à la charnière entre arts et sciences. Cela permet d'envisager des perspectives concrètes de progrès dans ces zones intermédiaires peu reconnues.

La conclusion reprend le bilan de cet article et permet de réfléchir aux voies d'optimisation de ces transferts de connaissance dans le futur proche.

## 2. La propagation ou la non-propagation des concepts dans une discipline et entre disciplines

Avant même de rappeler les modèles usuels de propagation en physique, ce qui constitue un cadre concret de réflexion, il est quand même utile de revenir sur quelques cas de non-propagation. En effet il arrive souvent que des groupes humains, à des lieux et à des époques différentes se posent des questions semblables et y trouvent des réponses semblables, mais différentes, sans la trace d'un quelconque échange entre ces groupes. Ce relatif isolement et cette indépendance dépendent évidemment de la question qui ne doit pas être univoque, et aussi de l'état des communications entre groupes à ce moment là. Nous allons donner quelques exemples de tels cas, dont certains ont été déjà notés dans l'article précédent : les pyramides et les écritures, et le dernier, la notation musicale, sera développé plus amplement plus loin dans cet article.

### 2.1. La non-propagation

Ce cas semble a priori curieux, c'est un cas limite, mais il est essentiel, comme le zéro parmi les nombres. C'est en effet un point important de résoudre soi-même ses problèmes, indépendamment des autres, voisins ou non. Bien sûr, l'éloignement physique et matériel, ici, l'absence de moyens efficaces de communication, renforcent cet état d'indépendance.

#### 2.1.1. Non-Propagation de la notion de pyramide

Un tel premier cas de figure a été déjà cité<sup>4</sup>. En effet de grandes pyramides sont apparues à peu près simultanément en Egypte, dans de nombreux sites de ce qui est devenu le Mexique, et aussi dans des

<sup>4</sup> C'est cité dans la référence 1.

sites de ce qui est devenu le Pérou, avec la civilisation Caral. Les hauteurs de ces pyramides sont différentes, mais toujours importantes, leurs formes sont assez semblables avec des bases carrées dans tous les cas, des pentes assez fortes, mais elles aussi différentes. La référence naturelle commune de ces pyramides semble bien être la dune, dont la pente maximale est définie par les propriétés mécaniques de ses constituants. De plus, des dunes existent dans les déserts proches de ces zones habitées, ce qui a donc pu inspirer les architectes de ces pyramides. A cette époque si reculée, il semble difficile de croire à une quelconque communication entre des peuples aussi éloignés. C'est donc un premier cas très clair de non-propagation et de coïncidence approximative des idées.

Dans l'article précédent nous avons montré que pour obtenir les impressionnantes masses des pyramides égyptiennes, des découvertes scientifiques avaient été effectuées et utilisées comme l'ont montré le professeur Daniel Bonn et son équipe<sup>5</sup>. C'est un bel exemple de collaboration entre scientifiques et artistes, ce qui semble fréquent aux premiers temps de l'humanité<sup>6</sup> où la société était bien moins compartimentée qu'elle ne l'est aujourd'hui.

### 2.1.2. Propagation restreinte de l'écriture

Un deuxième cas de figure de non-propagation ou de propagation réduite, est celui de l'invention de l'écriture, elle aussi déjà mentionnée dans l'article précédent, avec en particulier la référence à l'exposition « La naissance de l'écriture » réalisée à Paris en 1982 et le texte associé<sup>7</sup>. Le langage parlé a dû exister depuis très longtemps. Les animaux eux-mêmes utilisent des ensembles de sons complexes, dont la signification de certains a même été analysée et comprise. Par contre les traces du langage écrit dans l'humanité sont bien plus récentes. Le langage écrit a un potentiel de transmission beaucoup plus important que l'oral, à la fois dans le temps et dans l'espace, une permanence. Evidemment ce langage écrit est apparu par nécessité pratique, par exemple pour communiquer lors de grands travaux collectifs, ou pour faire des échanges commerciaux entre plusieurs parties en laissant des traces précises de ces accords.

Comme ils sont un support essentiel d'échange, les langages écrits se sont évidemment vite répandus dans leurs sphères respectives d'influence. Différents centres économiques indépendants existaient parfois à des distances atteignables par des commerçants nomades, aussi une telle propagation pratique a conduit localement à produire des traductions entre ces différents langages, comme c'est le cas des traductions inscrites sur la pierre de Rosette. Cette remarque signifie donc qu'il existe à la fois des cas de propagation et des cas de non-propagation, faute d'intermédiaires, dans le cas d'un grand éloignement.

A l'origine, le langage écrit est naturellement fait de dessins qui représentent symboliquement l'objet, l'acte, voire le sentiment. Ce langage iconographique est donc très riche, très complexe, puisque chaque idée nécessite une représentation. Ce langage se révèle ainsi à la fois puissant et aussi réservé à une élite savante, les lettrés, les scribes, capables d'une si grande culture. L'individu

<sup>5</sup> Précisément, le physicien néerlandais Daniel Bonn et son équipe ont publié en 2014 dans la fameuse revue scientifique « Physical Review Letters » à propos de la modification du coefficient de frottement du sable lors de son humidification, l'élément important de l'opération, l'article intitulé « Nonuniversality in the Pinch-off coefficient of yield stress fluids : rôle of non-local rheology » (PRL 113, 218302 (2014)). Cet article récemment complété par un suivant (PRL 134, 176202 (2025)) eut un retentissement international avec des articles de commentaires dans « The Washington Post » et « The Huffington Post » notamment, des journaux d'intérêt général mondialement connus, car ce travail révélait toute la qualité technique et scientifique insoupçonnée de ces constructeurs antiques.

<sup>6</sup> Les peintures des grottes préhistoriques témoignent d'une incontestable maîtrise technique et scientifique des matériaux et d'un art efficace largement reconnus. Picasso et d'autres peintres à sa suite s'en sont inspirés.

<sup>7</sup> 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, bien au-delà de ces pays.

ordinaire a, lui, besoin d'une version simplifiée, réduite, de ce langage, une version qui corresponde directement à son langage oral. Du coup, en général, des versions de langage écrit proches du langage oral, c'est-à-dire faites d'assemblages de phonèmes eux-mêmes décrits par quelques lettres, sont apparues dans la pratique et ont progressivement supplanté les versions iconographiques trop complexes.

Le Moyen Orient réunissant de nombreuses anciennes civilisations comme l'Egypte, la Mésopotamie et les pays proches, à la fois indépendants et en communication commerciale avec leurs voisins, a été un berceau de ces nouvelles versions phonétiques de langage écrit. Les pays d'Amérique ont dû connaître la même transition entre un langage écrit iconographique et un langage écrit phonétique qui s'est peu à peu imposé. Par contre, la Chine a toujours conservé son langage écrit iconographique et aussi sa structure sociale très hiérarchisée, les deux points étant probablement corrélés. Mieux, la Corée et le Japon ont aussi conservé cette écriture en sinogrammes. Là encore la longue pratique de communication a eu tendance à limiter petit à petit le nombre des signes utiles, mais cette écriture iconographique persiste encore sur un large territoire.

Cet exemple de l'écriture montre bien la complexité de ce phénomène de propagation d'informations, de concepts dans l'univers culturel. Tout d'abord il faut percevoir une connaissance physique de ce contenu de l'information, contenu qui peut alors être accepté ou rejeté pour des raisons qui peuvent mettre en jeu de nombreux mécanismes sociaux. La non-propagation peut même être volontaire, par choix délibéré, comme le montrent les exemples précédents.

### *2.1.3. Propagation restreinte de la musique*

Le dernier exemple que nous traiterons ici très brièvement est celui de l'écriture de la musique. Comme nous le verrons un peu plus loin, beaucoup du charme de l'écoute de la musique provient de résonances approximatives entre les sons émis successivement. Du coup, il existe plusieurs façons « mathématiques » d'organiser ces résonances d'une façon que l'on pourrait qualifier d'optimale. Donc initialement, selon leur localisation, les hommes ont choisi assez tôt différents codes musicaux pour optimiser ces résonances. Ensuite ces différents codes se sont imposés dans des régions assez étendues par propagation de proche en proche. Mais, in fine, il existe encore différents codes, différentes gammes, heureusement pas trop différents, ce qui a permis d'effectuer des traductions et d'obtenir ainsi, relativement récemment, des extensions du domaine musical. Ravi Shankar (1920-2012) sitariste et compositeur indien a été un exemple d'une telle traduction entre musique occidentale et musique indienne. Cet exemple ainsi que d'autres semblables, pour différentes traditions musicales, ont permis une relative transmission tardive de ces cultures en ajoutant de nouvelles couleurs sonores à la musique locale dominante. On a ainsi vu apparaître de nouvelles sortes de musiques composites, plus aptes à conquérir de larges publics. Dans ce cas la propagation de ces codes artistiques entre eux s'est produite grâce à une interface physico-mathématique qui a permis la transcription entre ces codes. On est ainsi passé d'une musique-art à une autre musique-art en passant par les sciences. Cela montre déjà la richesse et la complexité de ces phénomènes de propagation.

Ce bref aperçu nous permet de revenir à une vue rapide de la propagation en physique, qui pourra servir de référence concrète pour l'observation de la propagation des concepts.

## **2.2. La propagation des phénomènes physiques**

La propagation des phénomènes physiques peut même avoir lieu sans aucun support matériel, une réalité abstraite qui est donc difficile à comprendre. C'est effectivement un concept dur à admettre, mais important, d'autant que ces forces ainsi propagées sont très importantes, omniprésentes dans la nature et agissent très loin de leur source. Donc ce concept ne fut enregistré qu'assez tardivement dans l'humanité, relativement longtemps après les grandes découvertes. Ce délai avait permis à l'imagination de se libérer.

## 2.2.1. Propagation dans le vide

C'est le cas de la gravitation, l'attraction entre les masses, découverte par Isaac Newton (1643-1727), et c'est aussi le cas des forces électriques de Coulomb (1736-1806), des forces qui ont toutes deux des comportements similaires à longue distance, une décroissance lente. Une des nuances entre ces deux interactions est que les forces de gravitation sont toujours attractives entre les masses, tandis que les charges électriques sont positives ou négatives et que, des charges de mêmes signes se repoussent, tandis que des charges de signes opposés s'attirent. Du coup, pour la propagation de l'électricité, on parle ici de champ électrique pour indiquer cette possibilité de déplacement des charges qui dépend de leur signe, une sorte de distorsion se produit à l'intérieur de la matière selon le signe des charges, une voie bien différente de celle de la gravitation qui a un effet uniforme sur la matière.

### 2.2.1.1. Propagation dans le vide de l'électromagnétisme

Des charges en déplacement ont des effets plus complexes que des charges statiques. Ce déplacement des charges dans le temps et dans l'espace induit non seulement un champ électrique mais aussi un champ magnétique qui agit à son tour sur le déplacement des autres charges. Finalement le champ électromagnétique, cet ensemble d'actions électriques et magnétiques à distance a été bien étudié par Maxwell (1831-1879) et son équipe, avec cette dualité entre (position, vitesse) et (champ électrique, champ magnétique).

Ce champ électromagnétique, selon sa fréquence, c'est-à-dire selon la rapidité du mouvement des charges qui le produisent, a de multiples effets pratiques, c'est le rayonnement optique, mais c'est aussi l'infra-rouge et l'ultra-violet, les rayons X et les rayons gamma. Autrement dit, le champ électromagnétique représente un très large spectre de phénomènes physiques qui se propagent dans le vide et interagissent avec la matière.

Ces champs électromagnétiques pénètrent donc dans la matière, ce qui ajoute alors la réponse de la matière à ces sollicitations propres et élargit considérablement le problème puisque les contributions du champ initial et du champ induit se combinent. Le résultat de cette combinaison dépend évidemment de l'état, de la nature, de la matière en question. Dans un premier temps on considère la matière comme continue et uniforme, quitte à préciser ensuite sa nature de façon plus précise, plus réaliste, dans une approche plus détaillée.

## 2.2.2. Propagation dans la matière

La gravitation, c'est-à-dire les forces induites par la gravitation, agit sur la matière en provoquant des forces, des tensions, voire des déplacements si le milieu considéré est mobile. Un exemple pratique est l'effet de la marée qui est induite par l'attraction de la lune sur la masse d'eau des océans, une masse mobile dont le mouvement suit donc la fréquence des rotations de la lune autour de la terre.

### 2.2.2.1 Propagation de l'électromagnétisme dans la matière

Les forces électromagnétiques agissent sur la matière en déplaçant les charges potentiellement mobiles que sont, par exemple, les électrons plus ou moins liés à leurs atomes de référence. Selon la nature du matériau, deux sortes de réactions à ces sollicitations existent.

#### *Isolants*

Soit le champ électromagnétique pénètre profondément dans la matière et est freiné de façon uniforme par cette matière qu'il traverse et que l'on qualifie alors d'isolante. Dans ce cas, une partie du rayonnement est réfléchie dans le milieu initial, le vide, c'est-à-dire y revient. Le freinage correspond, quant à lui, à une transmission partielle d'énergie au milieu matériel rencontré, une absorption et en optique, ce changement de propagation est qualifié de réfraction, car la direction de propagation peut changer alors à l'interface.

Soit le champ électromagnétique produit une polarisation locale de la matière à la surface d'entrée du rayonnement. Et cette polarisation locale s'oppose à la propagation du champ électromagnétique à l'intérieur de cette matière. Cette matière est alors qualifiée de conductrice car elle a répondu à l'excitation, et le rayonnement électromagnétique est, lui, totalement réfléchi dans le milieu initial.

L'observation de ce phénomène de réfraction et réflexion en optique est bien entendu très ancienne<sup>8</sup>, très antérieure à la compréhension détaillée de l'électromagnétisme. En France on attribue sa formalisation avec la notion d'indice de réfraction à Descartes (1596-1650).

Ce qui nous intéresse ici du point de vue de la propagation en général est cet effet de freinage du rayonnement « réfracté », vis-à-vis du phénomène incident, tandis qu'une autre partie du phénomène incident est renvoyée, réfléchie, dans son milieu de départ. Et le second point est que ce freinage et l'absorption d'énergie associée dépendent de la nature du milieu matériel rencontré.

Un milieu matériel inhomogène, comme c'est le cas du corps humain traversé par des rayons X, va révéler différentes parties comme les os ou les muscles qui se comportent différemment avec ces rayons, notamment en les absorbant plus ou moins. Moyennant une résolution optimale des images ainsi produites, cela permet d'observer l'intérieur du corps sans pénétration, sans opération chirurgicale. La propagation de l'onde électromagnétique dans le corps va donner lieu à différents freinages et réflexions, tout comme à des absorptions.

### 2.2.3. Propagation de phénomènes élastiques dans la matière

Dans les milieux matériels plus ou moins denses, les atomes, les molécules, qui constituent ces milieux interagissent entre eux, avec des effets du type attraction-répulsion par exemple, et des effets plus complexes qui vont maintenir la structure à longue distance du matériau, selon sa rigidité et ses propriétés élastiques. Ces différentes propriétés élastiques permettent aussi la propagation d'ébranlements, d'ondes, de proche en proche, à travers ces milieux. C'est le cas du son qui a une nature simple dans un milieu très dilué comme l'air, mais a une nature beaucoup plus complexe dans un milieu dense, selon la nature des nombreuses interactions qui ont lieu dans ce milieu.

La propagation de ces ondes dépend donc fortement du milieu. Cette fois, plus le milieu est dense et réactif, meilleure et plus rapide est la propagation. A contrario des ondes électromagnétiques, ces ondes ne se propagent pas du tout dans le vide. Elles se propagent lentement dans un milieu peu dense comme un gaz, tandis qu'elles se propagent rapidement dans un milieu dense, liquide ou solide.

Dans un milieu composite, la propagation devient complexe, on peut observer plusieurs sons se propageant à des vitesses différentes. Ainsi, par exemple, il faut utiliser une source convenablement guidée pour obtenir des résultats d'échographie lors de l'observation de différentes parties du corps qui, chacune à sa façon, réfractent, réfléchissent et absorbent les ondes élastiques.

Ce petit rappel nous situe la complexité de la propagation dans des milieux homogènes et nous incite à considérer encore d'autres cas, d'autres géométries de propagation.

### 2.2.4. Propagation diffusive

Le premier cas considéré d'une telle propagation, évidemment dans la matière, est une errance, c'est la propagation aléatoire sur un réseau régulier, elle est aussi appelée « marche aléatoire » ou « marche

<sup>8</sup> En France on parle de la loi de réfraction de Descartes et en Grande-Bretagne de la loi de réfraction de Snell. Dominique Raynaud, historien des Sciences, a trouvé d'autres références à ces observations dans d'autres pays.

de l'homme ivre »<sup>9</sup> selon une expression imagée. Cette marche consiste à changer aléatoirement de direction à chaque pas. Ces pas étant de longueur déterminée. Le résultat est cette fois que l'éloignement du point de départ augmente en moyenne comme la racine carrée du temps<sup>10</sup> ! La propagation est donc différente et bien plus lente.

Cette remarque incite donc à considérer ce qui se passe sur un réseau à lacunes, ce qui impose des contraintes supplémentaires. Dans le cas d'un réseau réduit, d'une île par exemple, la propagation est limitée à la taille de l'île. De fait, il n'y a plus de propagation au-delà de l'île ! Du coup dans un système à lacunes, le cas où une seule voie ou juste quelques voies permettent de sortir de l'île devenue une presqu'île, le cheminement aléatoire est encore plus lent que la racine carrée du temps. Ces ponts, ces liens faibles prennent donc une importance considérable dans la propagation de l'information. C'est ce qu'a remarqué le sociologue Mark Granovetter en notant l'importance de ces liens faibles<sup>11</sup>. Du coup la matière lacunaire a pris un intérêt en physique<sup>12</sup> où elle a un intérêt non seulement pour des matériaux composites mais aussi lors de changements de phase comme la fusion ou la cristallisation où deux phases d'un même composé cohabitent comme la glace et l'eau avec de multiples fragments liquides ou solides qui coexistent. On peut aussi citer dans un registre différent la propagation des manifestations, un cas étudié par le juriste Didier Joubert<sup>13</sup>, c'est-à-dire une propagation clairement non uniforme.

Une version « petit poucet » de la marche de l'homme ivre, où les briques s'accumulent, a même eu un succès exceptionnel, vu le nombre de publications qui s'y réfèrent. Il s'agit de « l'agrégation limitée par la diffusion » (Diffusion limited aggregation en anglais, DLA en acronymes)<sup>14</sup> qui permet de construire de telles structures, où la propagation d'ébranlements est évidemment lente. L'algorithme de base propose la marche aléatoire d'éléments qui se figent lorsqu'ils rencontrent un autre élément, isolé ou non, amorçant ainsi la croissance d'un agrégat. Cette version relativement simple, car les interactions sont simplistes, a eu un grand succès car elle ouvrait la perspective de l'étude fine de beaucoup de situations<sup>15</sup>. Du côté modèle, cela signifie un développement informatique et notamment l'optimisation du caractère pseudo-aléatoire d'une suite de nombres et du côté expérimental, un développement de la précision de l'information.

---

<sup>9</sup> La notion de marche aléatoire a été introduite en 1905 par un mathématicien anglais, Karl Pearson, à propos de biologie. Elle fait suite au mouvement brownien aussi introduit pour la biologie. Les applications mathématiques aux modèles économiques ou physiques sont nombreuses (Lord Rayleigh, Markov, Polya). On cite à ce propos le travail de la thèse de Louis Bachelier sur la variation des valeurs en bourse.

<sup>10</sup> L'application des méthodes statistiques conduit à une répartition « gaussienne » des écarts et donc à un éloignement moyen « diffusif » proportionnel à la racine carrée du temps.

<sup>11</sup> Le sociologue Mark Granovetter a publié l'article « The strength of weak ties » dans le "American Journal of Sociology 78, pp. 1360-1380 (1973), suivi de « The strength of weak ties : a network theory revisited» dans Sociological Theory 1, pp. 201-233 (1983)

<sup>12</sup> Les phénomènes de transition de phase ont été largement étudiés avec de nombreux prix Nobel dont celui de Kenneth Wilson (1936-2013) obtenu en 1982 pour le groupe de renormalisation. Ces sujets ont largement débordé sur d'autres domaines avec notamment la création de l' « éconophysique » par le physicien H. Eugene Stanley en 1995.

<sup>13</sup> Didier Joubert a écrit l'article « The epidemic of collective violence, a manifestation of disorder and complexity » EPJ WOC 300, 01004 (2024) qui montre une propagation complexe selon un réseau de connexions.

<sup>14</sup> T.A Witten et L.M. Sander ont écrit l'article intitulé « Diffusion limited aggregation : a kinetic critical phenomenon » paru dans la revue « Physical Review Letters 47 pp.1400-1403 (1981)

<sup>15</sup> Parmi les développements il faut évidemment citer les fractals de Benoît Mandelbrot (1924-2010) et son livre : « The fractal geometry of nature » publié chez Freeman en 1982

## 2.3. Conclusions sur les modèles de propagation

Deux conclusions s'imposent : d'une part l'émergence au début du dix-neuvième siècle du thème de l'aléatoire correspond probablement à la constatation d'une profonde instabilité sociale d'où découlait un avenir aléatoire obsédant tout individu, scientifique ou non, et d'autre part, la difficulté de propagation des idées non obsédantes dans un monde complexe et à la mémoire volatile.

Du coup, il faut forcer le destin et créer des situations favorables à la diffusion des idées. C'est évidemment le cas de la revue « Arts et Sciences ». Mais un contact direct doit s'avérer plus efficace<sup>16</sup> et donc il faut aussi promouvoir des rencontres avec présence physique sur le thème « arts et sciences » pour apporter les conditions d'un échange fructueux entre les différents participants, ce qui implique donc des efforts de communication de part et d'autre.

La transition avec le thème suivant, « les pavages », est claire, puisque l'existence des pavages suppose des frontières entre domaines, entre espaces d'une certaine uniformité. Les pavages sont un peu le dual de la propagation.

## 3. Les pavages

Profitant de la référence à l'article précédent, nous commençons ici directement par étudier les pavages depuis leur développement avec l'art islamique jusqu'à leur présence aujourd'hui en soulignant les commentaires qu'ils suscitent dans les arts et les sciences, une façon concrète d'observer les connexions entre les arts et les sciences.

### 3.1. Les pavages de l'art islamique

L'art décoratif de l'islam est plus ou moins marqué dès son origine par la volonté d'absence de représentations humaines, animales ou végétales. Cette intention, avec ses nuances locales, qui peuvent être importantes, correspond à un désir évident d'abstraction, d'élévation de pensée, de spiritualité. Et cet effort intense et étendu d'abstraction de la décoration a conduit à une étude savante très poussée de la géométrie, une étude dont nous n'avons pas fini d'apprécier la qualité et le potentiel scientifique, même dans l'art comme dans la décoration.

Le point de départ des réalisations artistiques décoratives du monde musulman est tout simple, voire presqu'incontournable : la réalisation de découpages, de pavages pour décorer un panneau, un plan. C'est la réflexion sur l'assemblage des formes, une réflexion commencée très tôt, dès le début de la sédentarisation de l'humanité. Et cette réflexion basique s'est poursuivie au cours du temps, avec une analyse qu'il faut bien qualifier de mathématique, ce qu'elle est.

Ainsi les artistes de l'art de l'islam ont vite considéré l'assemblage de polygones réguliers de différentes symétries, en tirant parti de la régularité introduite par ces symétries, une idée très fructueuse, pour réaliser des assemblages de grandes dimensions de quelques motifs reproduits d'une part à l'identique et d'autre part à des échelles différentes. Cette économie de moyens était aussi pratique pour la réalisation ainsi standardisée.

#### *Les polyèdres réguliers de Platon*

Il faut bien dire que les cinq polyèdres réguliers de Platon, le tétraèdre - une référence en matière de pyramide : le thème architectural fort de l'Egypte et de la civilisation américaine précolombienne-, le cube, l'octaèdre, l'icosaèdre et le dodécaèdre avaient ouvert la voie à ce principe de décoration géométrique en mettant en évidence ces polygones réguliers.

<sup>16</sup> C'est tout à fait la remarque de Christian Ruby dans l'article « Arts et sciences, sciences et arts, sur une médiation en cours de réalisation » Le Philosophoire, 35 pp.129-143 (2011)

À partir de dessins, de plans, les artistes de l'art de l'islam ont ainsi réalisé des pavages en mosaïque ou en pierre. Ces pavages ont assez vite été répandus dans tout le si vaste monde islamique comme on peut encore le constater par les traces monumentales qui demeurent. Ce monde s'est rapidement étendu aux trois continents alors connus : Asie, Europe et Afrique en de nombreux témoignages exemplaires qui restent bien présents, à la fois par leur richesse géométrique et aussi par la qualité de leurs couleurs, voire de leur relief.

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 pour passer d'un polygone ou de quelques polygones à tout un ensemble de polygones jointifs. Cette recherche témoigne d'une forte détermination car elle a dû nécessiter beaucoup d'essais et aussi beaucoup d'imagination pour obtenir une telle variété de résultats, ce dont nous allons reparler. Car ces artistes ne se sont pas contentés d'une seule formule, mais la concurrence aidant, ils ont exploré quantité de possibilités.

Le résultat de ces réalisations est aussi une évidence de la proximité entre science et art. Ainsi à l'Alhambra de Grenade, un des hauts lieux de l'Andalousie, ces artistes ont multiplié des œuvres superbes de belle qualité mathématique, comme l'a noté le mathématicien Marcel Berger. Ce que Marcel Berger ne disait pas, c'est que parmi les œuvres de Grenade, de l'Andalousie, et du monde musulman, on peut observer non seulement ces pavages cristallins mais aussi des structures encore plus complexes dont on reparlera bientôt. C'est une avancée tout à fait exceptionnelle.

Ces constructions de Grenade sont bien sûr antérieures à 1492, avant l'expulsion des musulmans d'Espagne, et bien avant que la notion de symétrie cristalline ne soit même formulée. Et sans avoir besoin de connaître leur valeur scientifique, ces pavages nous illuminent encore par leur présence complexe et colorée.

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 n'a pas encore été observé dans la nature parmi les structures de solide, mais devrait l'être bientôt, comme nous allons le préciser un peu plus loin !

Les premières tentatives de réalisations concrètes, des mosaïques, de ces pavages de symétrie d'ordre 7, ces défis exceptionnels, datent environ de l'an 1100. Bien entendu, cette date se situe bien après les réalisations de pavages cristallins et des pavages quasicristallins dont l'étude systématique a rebondi après les observations scientifiques récentes.

Ainsi après la prévision de l'existence des quasicristaux de symétrie d'ordre 5 en 1982, et leur observation en 1984, qui a donné un supplément d'intérêt aux pavages de l'art de l'islam, différents auteurs ont recherché les premières traces de ces pavages encore plus complexes, encore plus originaux que ces quasicristaux si récemment observés.

Ce fut le cas de Jay Bonner et Marc Pelletier, des spécialistes en design, qui ont publié l'article « *A 7-fold system for creating Islamic geometric patterns I Historic antecedents* » dans la revue *Bridges 2012 : Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture*, p. 141-148, (2012). D'après leur étude bien documentée, le premier pavage de cette nature, c'est-à-dire de symétrie d'ordre 7, aurait été produit à Ghazna en Afghanistan vers 1100, donc très tôt.

La Figure 1 montre une partie du pavage du sol de la mosquée Bibi Khanoum (1404), dont le nom est celui de l'épouse (1341-1405) 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  $\tau$  est le nombre d'or soit 1.61803. 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'article d'où est issue cette coupe parut en 1982, deux ans avant la parution du premier article sur l'observation des quasi-cristaux dont la structure est tout à fait semblable et dont les figures de diffraction révèlent ces symétries originales. 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.

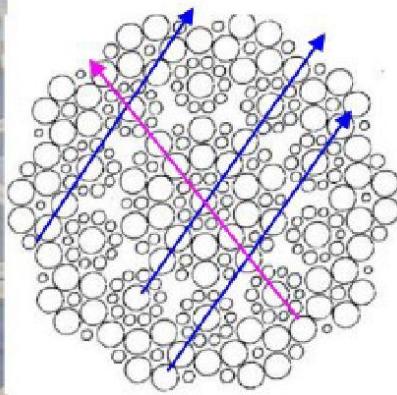
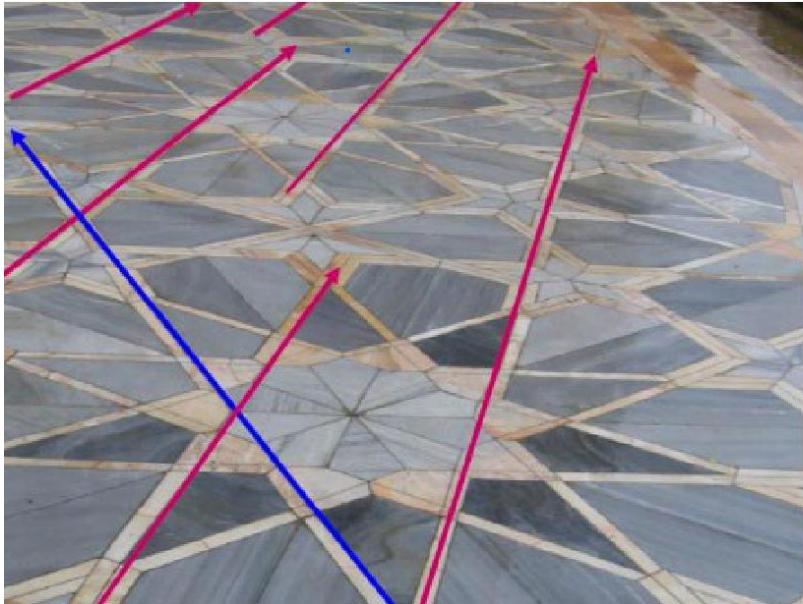
C'est dire combien est grande la distance temporelle entre ces réalisations artistiques et les études mathématiques et physiques qui se rapportent, bien plus tard, à des structures semblables de solides. Bien sûr les motivations des artistes et des scientifiques étaient très différentes et donc les dynamiques d'activité l'étaient aussi, mais la réalité de la nature, de l'objet est bien commune. Nous reviendrons plus loin sur ces thèmes car ces problématiques sont loin d'être closes, elles peuvent être étendues à des structures potentielles et méritent une attention soutenue car elles offrent aussi de nouvelles perspectives pratiques scientifiques et artistiques.

### 3.2. Self-similarité et fractales

De fait ces créateurs de pavages bien concrets, de mosaïques, ont utilisé des propriétés d'autosimilarité, de ressemblance à grande échelle, bien avant que des mathématiciens comme B. B. Mandelbrot ne les formulent. Benoît 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, ainsi que B. Grünbaum et G. C. Shephard, ces derniers dans leur ouvrage synthétique « *Tilings and Patterns* » paru en 1987 chez W.H. Freeman. Ces fameux triangles autosimilaires de Roger Penrose ont même été mentionnés lorsqu'il a reçu le prix Nobel de physique en 2020.

Comme les exemples donnés dans l'article de Jay Bonner et Marc Pelletier le montrent, ces schémas de pavage ont été assez vite largement répandus dans tout le monde musulman ; en quelques dizaines d'années, voire un peu plus. Ce succès incontestable témoigne d'une profonde avancée scientifique et artistique à la fois, ce qui a séduit tant d'amateurs. Aussi ces résultats méritent d'être visualisés ici sur une photographie complétée par un extrait d'une simulation réalisée dans le cadre d'études ultérieures de physiciens. La comparaison visuelle souligne la réalité de cette proximité.

La Figure 1 donne un exemple des différents pavages observés à Samarcande en Ouzbékistan, un des nombreux sites de cet art largement propagé en Asie, en Europe et en Afrique. Il faut ajouter ici que la compétition entre des artistes qui ont, chacun, tenus à se singulariser par rapport à leurs proches voisins, a donné lieu à des œuvres d'une qualité exceptionnelle. Une telle émulation a du bon pour le spectateur, et c'est une émulation à la fois scientifique par la recherche des thèmes, et artistique par le choix des matériaux et de leurs couleurs.



**Figure 1.** Une partie du pavage du sol de la mosquée Bibi Khanoum située à Samarcande (Ouzbékistan). La taille des éléments du pavage n'a pas permis de réaliser une parfaite harmonie des couleurs, mais l'ensemble reste très agréable à la vue. On remarque la symétrie d'ordre 10 de l'ensemble soulignée par les traits parallèles rouges et le trait bleu à 72°. On compare à droite avec la coupe d'un agrégat à symétrie icosaédrique, coupe perpendiculaire à un axe d'ordre 5, où l'on remarque les alignements similaires décalés de 72°. Cette coupe fait partie du travail présenté par D. Mercier et J.-C.S. Lévy à une conférence de la 3M (*Magnetism and Magnetic Materials*) à Montréal en 1982. Ce travail est commenté plus tard dans le texte.

L'article « *Amorphous structures : a local analysis* » de J.-C. S. Lévy et D. Mercier qui sert de base au dessin introduit dans la figure 1 a été présenté à la conférence 3 M (*Magnetism and Magnetic Materials*) à Montréal en juillet 1982 et est paru en 1982 dans la revue « *Journal of Applied Physics* ». Il a été complété par l'article « *Construction of amorphous structures* » paru en janvier 1983 dans la revue « *Physical Review B* **27**, 1292 » par les mêmes auteurs qui ont aussi étudié les propriétés élastiques d'une partie de ces structures qui constitue alors un agrégat dans : « *Local elasticity properties of an amorphous structure : evidences for typical sites and shell structure : Dynamic stability* » un article paru en février 1984 dans la revue *J. Physique* **45** pp.291-301.

L'article sur le premier matériau observé correspondant à cette symétrie de l'icosaèdre, et qualifié de « quasi-cristal » peu de temps après la parution de cet article, s'intitule : « *Metallic phase with long range orientational order and no translational symmetry* ». Le titre de cet article signé par D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias et J.W. Cahn précise bien à la fois le caractère non cristallin de ce matériau et ses propriétés étendues de symétrie. Cet article est paru en 1984 dans la revue « *Physical Review Letters* **53**, 1951 ». D. Shechtman a reçu le prix Nobel de chimie en 2011 pour cette découverte. Peu après la parution de cet article, D. Levine et P. J. Steinhardt ont fait paraître, toujours en 1984, l'article « *Quasicrystals : a new class of ordered structures* », toujours dans la revue « *Physical Review Letters* **53**, 2477 ». Cet article-là a donné ce nom à cette nouvelle classe de matériaux ainsi qu'à une classe plus large de matériaux dont les symétries sont d'ordre 5, 8 ou 12. Peu de temps après, le regretté Christopher Henley (1956-2015) a noté dans son article « *Sphere packings and local environment in Penrose tilings* » paru en 1986 dans la revue « *Physical Review B* **53**, 797 » que, curieusement certaines des figures parues dans son article et certaines des figures parues dans l'article de Socolar et Steinhardt intitulé « *Quasicrystals II : Definition and Structure* » étaient identiques à des figures de l'article de Mercier et Lévy paru en 1983. Signalons aussi que P. J. Steinhardt a poursuivi cette recherche en cosignant bien plus tard l'article « *Decagonal and Quasicrystalline Tilings in medieval islamic art* » de P. J. Lu et P. J. Steinhardt, paru dans « *Science* **315** 1106-1110 (2007) ». Ils signaient ainsi un retour des structures cristallines et quasi-cristallines aux sources imaginées de l'art islamique.

### 3.3. La physique des quasicristaux et au-delà

Le surgissement de ces images de physique tout à fait comparables aux pavages islamiques traditionnels impose donc de revenir sur le contexte de la physique récente de ces matériaux denses pour comprendre ce phénomène. Nous allons considérer cette physique en plusieurs temps, c'est-à-dire selon plusieurs approches.

En effet le moteur économique de la physique, et donc un moteur à effets rapides, puisqu'il déclenche des moyens puissants, est celui de la recherche de nouveaux matériaux pleins de promesse, tandis que le moteur à long terme de la physique, ce qui sous-entend une certaine lenteur, est celui de la compréhension des phénomènes, l'aspect théorique, qui n'est pas vraiment lié à la production immédiate.

#### 3.3.1. La trempe, la trempe rapide et son avenir

Dans le cas qui nous intéresse, l'apparition de nouvelles techniques de « trempe » a fait surgir l'espoir de la production d'une grande variété de nouveaux matériaux de toutes sortes de propriétés potentiellement utiles pour l'industrie. Ce « *tsunami* » expérimental fut et est encore le moteur d'une recherche active, car comme le montre si bien l'historien Fernand Braudel à propos de l'invention de la machine à vapeur, l'innovation est faite d'une multiplicité d'avancées, et une première découverte est peut-être la trace d'une ou plusieurs autres à venir.

La trempe des aciers, des bronzes et des verres est un phénomène bien connu de refroidissement rapide. Ce procédé physique utilisé depuis longtemps dans l'industrie permet d'obtenir des matériaux originaux dont la texture fine est différente de celle des matériaux bruts et dont les propriétés physiques sont aussi originales. L'exemple bien connu des aciers trempés évoque des matériaux particulièrement durs. La prononciation du mot anglais qui signifie trempe : « *quenching* » rappelle bien phonétiquement l'effet de « coinçage » de la texture ainsi réalisée par cette transition brutale.

Un premier grand changement dans cette perspective de développement industriel a été celui de la découverte de la « trempe rapide » ou « trempe sur roue », introduite en Californie en 1960 par le physicien belge Pol Duwez (1907-1984). Cette expérience de trempe ultra-rapide dite de « *splat quenching* » permet de réaliser des « verres métalliques » à partir de mélanges en fusion pour donner des films très minces. Cette nouvelle découverte s'est répandue rapidement dans le milieu scientifique, et il en est vite résulté une grande quantité de films minces de verres métalliques. Leurs observations ont donné lieu à de nombreux résultats et pour enregistrer, comparer ces nombreux résultats et en faire la synthèse, on a organisé des conférences scientifiques désignées sous le nom de RQM (« *Rapidly Quenched Materials* »).

#### RQM

La chronologie de ces conférences et leur localisation donnent bien une idée de la propagation spatio-temporelle de ce phénomène dans le monde scientifique actuel et donc de son importance pratique. La première RQM a eu lieu en Europe, à *Brela* en Yougoslavie en 1970, donc dix ans après la mise au point de la méthode. La suivante a lieu à *Cambridge, Massachusetts*, USA en 1975. Les suivantes sont encore plus rapprochées dans le temps et plus variées dans leur localisation : RQM 3 à *Brighton UK* (1978), RQM 4 à *Sendai* Japon (1981), RQM 5 à *Würzburg* Allemagne (1984). Cela continue, nous en sommes à RQM 17 à *Varsovie* Pologne (2023) et RQM 18 à venir à *Busan* en Corée (2026). Il faut quand même ajouter que le thème initial s'est élargi pour les dernières conférences RQM en y ajoutant le thème des structures métastables. La thématique s'est donc un peu étendue.

#### HEA

L'actualité très récente de cette nouvelle thématique consiste à imposer cette fois la présence d'au moins trois éléments en quantité comparable, une garantie de complexité et surtout de variété de ces nouveaux matériaux agrégés. En effet au début des RQM, on s'intéressait à des matériaux composites

où un ou deux éléments dominaient largement dans la composition, ce qui laissait aux autres éléments le rôle de bouche-trou. Ce sont donc les « *High Entropy Alloys* » (HEA) Conférences, qui portent cette nouvelle thématique et l'on en compte déjà beaucoup. Une HEA a eu lieu à Pittsburgh en 2023, une autre à Londres en 2025, une nouvelle est prévue à Los Angeles en 2026. La fréquence déjà élevée s'accélère, et les espoirs sont bien sûr de la même taille. Evidemment on a déjà retrouvé parmi les résultats de ces HEA des structures locales icosaédriques<sup>17</sup>, on reviendra par la suite sur l'explication de ce phénomène.

### 3.3.2. Vers de nouvelles structures !

Et surtout on peut espérer trouver ainsi des structures de symétrie plus complexe, au-delà de celles des quasicristaux. Ainsi dans les couches électroniques successives, s, p, d et f des éléments lourds, on compte 2, 6, 10 et 14 électrons respectivement, ce qui donne de l'espoir pour trouver plus de liaisons chimiques pour un même élément, des états de « valence » plus élevés et donc potentiellement des structures plus complexes. Pour cela il faut utiliser des éléments « lourds » de masse nucléaire élevée, à l'origine de ces multiples liaisons potentielles et par exemple des terres rares. Les résultats sont à venir.

Venons-en donc maintenant à ce que l'on peut considérer comme le fond de cette histoire ou la partie théorique physico-mathématique. Le premier point est la situation particulière de l'icosaèdre et du dodécaèdre par rapport aux autres polyèdres réguliers. Le deuxième point qui est une conséquence indirecte du premier, est la différence entre les petits assemblages et les grands assemblages. Cette différence produit un schisme, une séparation entre petits et grands ensembles, et enfin le dernier point est la notion de taille critique entre petit et grand, autrement dit les notions de taille moyenne ou de lieu de rupture. Tout cela semble anodin, mais peut mener loin comme on va le voir.

### 3.3.3. De nouvelles architectures et sculptures à symétrie d'ordre 5

Pour construire un bâtiment de forme sphérique, on peut justement se servir d'une telle construction à base d'icosaèdre ou de dodécaèdre et l'améliorer, comme dans le cas du ballon de football. C'est la recette qu'a appliquée l'ingénieur allemand Bauersfeld (1879-1959) dès 1925, puis l'américain Buckminster Fuller (1895-1985), inventeur et architecte, cette fois avec la production de dômes géodésiques dès 1945. Deux exemples célèbres d'une telle construction issue de l'icosaèdre, sont le dôme géodésique de Montréal, « la Biosphère », une structure de 80 mètres de diamètre construite à Montréal en 1967, et la « Géode » cette salle de cinéma de 36 mètres de diamètre construite à Paris en 1985. La propagation a donc été large dans le temps et dans l'espace.

Ces structures géométriques se développent dans l'espace avec une masse minimale de côtés solides. Elles ont induit une nouvelle sculpture dite de « tenségrité », qui a un certain succès dû aussi à la fois à ce caractère minimaliste et à une complexité séduisante.

### 3.3.4. De l'architecture urbaine à l'architecture atomique de même symétrie

Le succès international de ces dômes, faciles à construire, fut tel que les chimistes Kroto, Curl et Smalley qui observèrent des structures de carbone C<sub>60</sub>, C<sub>80</sub>, d'allure comparable aux dômes précités, mais d'une toute autre échelle, les appellèrent « *buckminsterfullerenes* » dans leur publication dans la revue « *Nature* **318**, 162 (1985) ». Quel bel échange entre art et science ! Et Kroto (1939-2016), Curl (1933-2022) et Smalley (1943-2005) reçurent le prix Nobel de chimie en 1996 pour leur découverte des « *fullerenes* ». Car c'est finalement le mot *fullerene* qui est resté jusqu'à présent le nom de ces structures ! Le va-et-vient entre science et art se produit donc parfois rapidement dans les deux sens, avec une belle propagation.

<sup>17</sup> Les chercheurs J. Ding, M. Asta et R.O. Ritchie ont publié l'article « *Melts of CrCoNi-based high-entropy alloys : Atomic diffusion and electronic/atomic structure from ab initio simulations* » dans la revue « *Applied Physics Letters* **113** 111902 ( 2018). Ils ont observé la présence de symétrie icosaédrique dans ces alliages d'une rigidité exceptionnelle.

### 3.4. Différents effets de taille critique dans différents domaines !

Enfin cette propriété curieuse de symétrie optimale non cristalline, n'est pas vraie à une et deux dimensions, où les assemblages cristallins à la queue leu-leu et en nid d'abeille sont aussi les plus symétriques ! Cette singularité de l'espace à trois dimensions signifie donc que les petits systèmes et les grands ont des comportements différents dans cet espace à trois dimensions, le nôtre ! Ce nouveau principe entraîne beaucoup de conséquences.

#### 3.4.1. Stabilité et instabilité des espèces animales

Une telle différence entre petits et grands systèmes explique par exemple la disparition des dinosaures, curieusement plus fragiles, plus sensibles aux aléas par exemple climatiques, du fait de leur grande taille, alors que des traces de vie à des échelles plus petites ont survécu à de tels aléas. La situation actuelle de l'humanité, très nombreuse, très active et donc interférant fortement avec son environnement, évoque aussi une telle fragilité, cette fois-ci due à une très large extension à la fois en nombre et en interaction avec l'environnement.

#### 3.4.2. Stabilité des agrégats catalytiques

De même en chimie, l'étude de petits agrégats métalliques de fer, cobalt et nickel, formés à relativement basse température par synthèse en milieu polyol, montre que l'agrégat ainsi formé démarre autour d'un ion platine, puis s'accroît par dépôt d'ions de fer, cobalt ou nickel en couches successives autour de cet ion initial fédérateur, jusqu'à ce que l'ion platine, fondateur, ne soit, vraisemblablement, expulsé de l'agrégat initial et ne redémarre la construction d'un nouvel agrégat autour de lui. C'est une remarque récurrente de l'équipe de chimistes du professeur Fernand Fiévet<sup>18</sup> de l'Université Paris Cité. Cette remarque s'appuie sur une très longue pratique expérimentale de cette synthèse originale d'agrégats utiles pour leurs propriétés catalytiques.

Le point théorique qui prolonge ces genres de problème dans d'autres circonstances est celui de l'existence d'une taille critique de structure qui sépare deux genres de comportement, bien différents pour des petits et des grands ensembles. Cela indique donc un phénomène nouveau, une question à la fois de structure et de dynamique, qui a lieu lorsque l'on atteint cette taille dite critique.

#### 3.4.3. Stabilité structurelle des agrégats

Le premier point qui vient à l'esprit quand on parle de taille critique après ces considérations de structures est, pour cette taille précise, celui d'une manifestation de faiblesse dans ces structures quasicristallines de symétrie icosaédrique à une seule espèce atomique. Nous avons évidemment étudié cela en considérant les propriétés élastiques locales de ces structures et trouvé des tailles critiques qui dépendent un peu de la nature des interactions considérées<sup>19</sup>. Une approche parallèle consiste à considérer des agrégats qui peuvent être formés en vol dans un milieu raréfié et à observer leurs structures pour différentes tailles d'agrégats. De telles expériences ont été faites notamment par l'équipe d'Yves Farge à Orsay sur des agrégats de gaz rares et ont été aussi simulées. Là encore on trouve des tailles critiques qui sont autour de 300 éléments avec de petites structures icosaédriques et de plus grandes structures composées de parties cristallines<sup>20</sup>. La nature des grandes structures dépend bien sûr de la nature de l'interaction entre les éléments, ce qui s'observe bien dans les simulations.

<sup>18</sup> Fernand Fiévet, professeur de chimie à l'Université Paris Cité prépare ainsi ses catalyseurs depuis l'anotamment fin des années 80, cf. l'article de F. Fiévet, J.-P. Lagier, M. Figlarz « *Preparing monodisperse metal powders micrometer and submicrometer sizes by the polyol process* » MRS Bull. **14** 29-34 (1989)

<sup>19</sup> C'est le résultat de l'article intitulé “*Local elasticity properties of an amorphous structure : evidences for typical sites and shell structure ; dynamic stability*” de J.-C.S. Levy et D. Mercier, paru dans J. Phys **45** 291-301 (1984)

<sup>20</sup> Par exemple dans l'article « *Structural transitions in clusters* » de A. Ghazali et J.-C.S. Levy paru dans Phys. Lett. A **228**, 291-296 (1997)

### **3.4.4. Stabilité des noyaux atomiques, étoiles à neutrons et nouveaux éléments**

Cette valeur particulière de 300 éléments comme seuil critique fait aussi songer au nombre maximum de nucléons d'un atome. On ne connaît pas beaucoup d'atomes de plus de 300 nucléons, et parmi les atomes d'environ 300 nucléons, beaucoup sont radioactifs, c'est-à-dire instables, à des niveaux différents, par exemple avec des radioactivités différentes selon les isotopes considérés. Cependant à propos de structures riches en nucléons, il existe aussi des étoiles à neutrons qui contiennent, elles, des ensembles denses et complexes de neutrons. Ces étoiles contiennent évidemment bien plus que 300 neutrons, au-delà de ce seuil apparent. Donc on peut soupçonner une certaine analogie entre les structures d'agrégats atomiques et les structures d'agrégats de nucléons, avec bien entendu, des interactions spécifiques entre nucléons, et donc en conclusion l'existence de nouveaux atomes particulièrement lourds de plus de 300 nucléons.

### **3.4.5. Stabilité et masse critique**

La répétition du mot taille critique suggère encore une analogie avec la « masse critique » de la bombe atomique. Cette observation mérite vraiment un détour du fait de l'importance à la fois stratégique et dramatique de cet effet. Dans le résumé de cette expérience, les noyaux atomiques « fissiles » émettent spontanément de temps en temps des neutrons, et lorsqu'ils reçoivent des neutrons, par exemple ceux émis par leurs voisins, ils peuvent exploser au bout d'un certain temps en émettant à leur tour des neutrons et d'autres éléments selon différentes possibilités, dans une réaction dite en chaîne puisque les neutrons ainsi émis vont à leur tour interagir avec d'autres noyaux et produire d'autres neutrons. Autrement dit l'ensemble de ces réactions en chaîne est complexe et dépend de la structure géométrique de cet ensemble d'atomes « snipers ». Le résultat est bien sûr dangereux puisque l'on connaît les terribles dégâts causés par les bombes atomiques et nucléaires. Le point pratique important est ici que, si la masse de matériau fissile considérée est relativement petite, la réaction ne s'emballe pas, tandis que si elle est grande, la réaction s'emballe, devient explosive et terriblement destructrice. Pour rappel, la masse critique de la bombe historique était estimée être de l'ordre de 10 kg.

Le procédé opérationnel de la mise au point de cette arme consiste donc à préparer de petites masses « sous critiques » de ce produit fissile, puis à les réunir au moment choisi, de façon à passer au-delà de ce seuil critique pour produire alors l'explosion. Autrement dit, il ne faut pas se tromper sur les quantités, sinon on saute si la masse préparée de façon groupée est trop grande, ou rien ne se passe si la masse totale préparée est finalement trop petite. L'enjeu de ce calcul difficile est donc énorme, à la fois pour limiter le risque lors de la préparation et pour assurer ensuite la réussite de l'explosion.

## **3.5. Retombées scientifiques du calcul de la masse critique: l'électronique moderne**

Cette nécessaire précision dans le calcul a conduit à inventer alors, dans le cadre de ce projet « Manhattan », des principes de calcul innovants incluant un aspect probabiliste comme la méthode de Monte-Carlo utilisée pour résoudre ces problèmes délicats de réaction en chaîne avec un résultat précis. Pour cela, on a utilisé les premiers ordinateurs disponibles, qui étaient à lampes électroniques, triodes et pentodes. Juste retour des choses, ces méthodes statistiques comme la méthode Monte-Carlo sont devenues par la suite très utiles pour traiter de l'évolution spontanée des systèmes, comme la structure des agrégats dont nous venons de parler, en tenant compte, grâce à elles, d'un certain caractère aléatoire des processus, cette fois d'agrégation.

Pour effectuer les nombreux calculs numériques qui étaient alors nécessaires, on a ainsi été amené ainsi à utiliser les premiers calculateurs électroniques qui étaient « à lampes », à tubes électroniques, c'est-à-dire à la fois encombrants et énergivores. Le succès des conclusions de ce calcul et de leurs applications a vite amené l'essor de l'électronique moderne, à composants solides, puisque la découverte du transistor chez Bell labs date de 1947, très peu de temps après l'explosion des premières bombes atomiques en 1945. Il faut quand même dire que cette piste de l'électronique à composants solides était déjà anticipée depuis l'utilisation du détecteur à galène en radio.

### **3.6. L'utilisation des pavages dans la décoration depuis la grande époque de l'art de l'islam**

La notion de pavage, d'occupation du plan, de l'espace est restée gravée dans les mémoires depuis longtemps, mais le niveau très élevé atteint par l'art islamique a marqué son évolution et donc l'a isolée un peu dans sa rigueur. De même l'absence de motifs figuratifs dans les pavages, leur donne une certaine froideur.

Citons quand même deux exemples artistiques proches de cette tradition géométrique et donc évidemment reliés à l'art islamique lui-même. Ainsi parmi les tapis, un art oriental, les « tapis de Boukhara » gardent fidèlement le principe d'une structure géométrique et aussi une opposition relativement austère de couleurs foncées entre rouge et noir. Bien sûr Boukhara est en Ouzbékistan, assez près de Samarcande et donc au cœur de cette tradition artistique.

D'autre part, les « azulejos », ces faïences portugaises, conservent aussi ces formes géométriques, cette fois avec un bleu plein de douceur. Là encore l'histoire relie bien le Portugal, qui fut à l'origine des grandes découvertes, à ces hauts lieux de l'art islamique situés près du parcours des navigateurs. Mais le pavage et l'aspect géométrique de la décoration ont eu aussi beaucoup d'autres applications, de haut niveau, dans la décoration, et en particulier dans la décoration des palais modernes.

#### **3.6.1. Le pavage des palais**

Ainsi le Versailles de Louis XIV a eu de grandes ambitions et est donc devenu assez naturellement un haut lieu du pavage dans différents domaines, et une référence de haut niveau artistique. Citons déjà le parquet avec pour exemple les structures complexes du parquet de la galerie des Glaces. Les jardins de Le Nôtre sont un autre exemple de structures géométriques, même si ces structures sont souvent complétées par la présence de quelques sculptures figuratives ! L'architecture classique a apporté le goût des colonnes apparentes en façade, un art développé par Palladio, avec une large influence sur l'architecture, une influence issue du livre de Vitruve. Et l'art du pavage a encore enrichi ce décor.

A Versailles et surtout au Grand Trianon, autrefois appelé Trianon de marbre, construit par Jules Hardouin-Mansart et achevé en 1687, les plaques de marbre servent de décoration en alternance avec les colonnes du même marbre ou d'un marbre assorti. C'est en particulier un marbre rouge veiné appelé « incarnat » et issu des carrières de Caunes-Minervois, qui a été utilisé en alternance avec un marbre blanc. La réussite de ce pavage coloré peut se mesurer au nombre de copies effectuées du Grand Trianon, plus ou moins tard et plus ou moins loin, dont, par exemple, cet hôtel particulier où demeure Xavier Niel, près du jardin du Ranelagh à Paris. Cet hôtel, malheureusement appelé « Petit Trianon » alors qu'il ne ressemble pas au « « Petit Trianon », mais au Grand dont il est une réplique réduite ! Et les copies royales du Grand Trianon que sont les palais de « Sans souci » à Potsdam, « Schönbrunn » à Vienne et « Peterhof » près de Saint Pétersbourg rivalisent de couleurs et de jardins à décoration géométrique avec Versailles et le Grand Trianon.

L'ère industrielle va apporter une puissance nouvelle à l'architecture et l'urbanisme à la fois par les nouvelles concentrations urbaines et par les possibilités techniques alors disponibles.

#### **3.6.2. Les pavages à l'époque des chemins de fer**

L'étape suivante de l'évolution des pavages et de leur structuration géométrique, c'est pratiquement celle de la révolution industrielle. Bien sûr la nouveauté, c'est alors le chemin de fer, les gares, le tourisme avec les grands hôtels, le thermalisme et bien sûr, l'industrie, les banques. Un nouveau style architectural, sérieux, imposant le respect, se développe alors avec ses propres codes géométriques. En France c'est le style Haussmannien qui arrive dès 1850, avec ses règles, peu de temps après les débuts de cette nouvelle civilisation. L'effet de ce renouveau architectural et artistique se produit alors à grande échelle du fait du nouveau potentiel industriel et du désir de laisser son empreinte.

En Angleterre, Turner va peindre les panaches de fumée autour de la locomotive d'un train franchissant un pont, ce qui va marquer la peinture. A son tour la diffusion de la lumière par ce nuage de fumée va déclencher les débuts de l'impressionnisme en France et toute une recherche sur la diffusion de la lumière par les irrégularités du paysage.

Les trains vont aussi déclencher un nouveau mouvement architectural pour célébrer leur présence. Aux Pays-Bas, la gare centrale d'Amsterdam (1889) a des allures de palais, elle contient d'ailleurs un pavillon royal. Elle va servir de modèle pour la gare centrale de Tokyo (1914) qui, depuis, a subi de nombreuses rénovations à la suite notamment de tremblements de terre. En France les gares et les grands hôtels développent progressivement le style Haussmannien avec ses règles et aussi son goût pour les dômes bulbeux, une tradition orientale<sup>21</sup>.

Les nouveaux styles architecturaux se développent parallèlement à ces styles officiels dans tout le monde industriel. Ce sont le style Art Nouveau aux multiples déclinaisons locales, puis le style Art déco, tout aussi largement propagé.

Le style Art Nouveau impose une décoration à motifs floraux plus ou moins complexes, avec l'exemple des décorations du métro parisien et de nombreux immeubles parisiens réalisées par Hector Guimard (1867-1942). Ce mouvement est aussi bien représenté à Bruxelles avec par exemple les décors intérieurs très complets de Victor Horta (1861-1947) et notamment le mobilier très élaboré, très travaillé. La compétition artistique est évidemment au moins européenne et on ne peut pas oublier le catalan Antoni Gaudi (1852-1926) et ses multiples réalisations, parfois toujours en cours de réalisation. Toute l'Europe participe à ce mouvement qui porte une réaction au développement industriel avec ce retour de la décoration florale. C'est une réaction quand même pondérée car elle s'appuie aussi sur l'efficacité de ces nouvelles techniques industrielles pour produire de si nombreuses œuvres imposantes.

Le style Art Déco s'appuie lui sur des formes géométriques élaborées et est en cela plus en continuité avec les pavages islamiques. Un superbe exemple de ce style est le Chrysler Building (1930) à New York et sa flèche décorée. Dans ce style imposant, la compétition, de ce haut niveau, devint vite internationale avec le Rockefeller Center (1939) à New York, l'Université Lomonosov (1953) à Moscou ou Le Palais de la Culture et de la Science à Varsovie (1955), des immeubles finalement parents de la pyramide et du style gothique pour leur élan vertical et leur aspect global.

Le renouveau des pavages en architecture a suscité un intérêt accru chez les peintres et les autres artistes.

### 3.6.3. *L'influence du pavage sur la peinture et la décoration modernes*

Notons aussi que les réussites artistiques de l'art islamique ont eu une réelle descendance directe, mais largement différée dans la peinture moderne. Dans ce sens une première série de tableaux vient en France avec le « cubisme », une des époques de Pablo Picasso (1881-1973), et son style géométrique. De nombreux artistes comme Robert Delaunay (1885-1941), Sonia Delaunay (1885-1979) et Jacques Villon (1875-1963) ont aussi déployé ces formes géométriques du cubisme. En Allemagne le courant « Blaue Reiter » correspond assez à cette tradition avec, cette fois, son choix de couleurs fortes et ses formes géométriques développées par Vassily Kandinsky (1866-1941), Paul Klee (1879-1940) et August Macke (1887-1914).

Mais le grand retour des pavages plus traditionnels vient avec les tableaux abstraits du peintre néerlandais P. Mondrian (1872-1944). Ces tableaux sont marqués par le nombre d'or caractéristique de la symétrie d'ordre 5 (1918). Un autre artiste néerlandais, M. C. Escher (1898-1972) resta longtemps en résidence à Grenade, ce haut lieu des pavages islamiques et est resté imprégné toute sa vie de ces

<sup>21</sup> Il faut encore citer l'Histoire de l'architecture d'Auguste Choisy, déjà citée dans la référence 1.

pavages qu'il a su faire siens en les enrichissants d'annotations plus personnelles figuratives. Ainsi avec lui les polygones peuvent devenir des oiseaux ou des poissons selon leurs positions. Son jeu permanent avec les mathématiques les plus sophistiquées comme la géométrie hyperbolique où il mélange savoureusement « Anges et Démons », lui permet d'obtenir des créations de pavages d'une grande originalité.

À son tour l'architecte Jean Nouvel a produit à Paris la structure complexe des mouscharabiehs de l'Institut du monde arabe (1987), une structure dynamique, mouvante, malheureusement bloquée dans son évolution par des soucis techniques. Depuis, Jean Nouvel a su encore jouer les « paveurs » sur la « Philharmonie de Paris » (2015) en y reprenant les thèmes chers à Escher pour envelopper ce lieu de concert. 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. Jean Nouvel s'est bien servi de cette inspiration avec ici un pavage ondulant dans l'espace, et qui joue aussi avec la lumière de son environnement.

Sur ce thème de l'enveloppe d'un volume considérée comme un pavage de cette surface, on peut aussi considérer les emballages éphémères de Christo (1935-2020) et Jeanne-Claude (1935-2009), deux artistes originaux et très créatifs, comme des pavages, à Paris, avec par exemple l'emballage du Pont Neuf (1985) puis pour finir celui de l'Arc de Triomphe de l'Etoile (2021). Ils ont aussi réalisé à Berlin l'habillage du Reichstag (1995) et à New York, celui de « the Gates » (2004-2005).

Dans un genre assez proche, on ne peut pas oublier les multiples pavages, éphémères ou non, de Daniel Buren, que ce soit dans la cour d'honneur du Palais Royal avec ce que l'on appelle maintenant les colonnes de Buren (1988), sur, et dans, le Grand Palais à l'occasion de Monumenta (2012) ou sur les parois de la Fondation Louis Vuitton (2016).

Avec ces grands exemples, le pavage décoratif a repris, reconquis sa place dans l'espace urbain et les décorateurs du Street Art ne s'en sont pas privés.

### 3.6.4. *Les pavages et le Street Art*

A ces exemples assez nombreux, il faut ajouter cette nouvelle version de la peinture qu'est le « Street Art », un art, souvent figuratif, mais aussi parfois géométrique, au moins dans son fond, du fait des grandes surfaces considérées pour ces décos sur des murs qui ne sont pas toujours aveugles. Ces grandes surfaces imposent une structuration géométrique de cet espace à peindre. La modernité du Street Art, sa présence incontournable dans le nouvel espace urbain, en font un élément phare du nouveau monde artistique accessible à tous. A son tour il est devenu un reflet de ce monde si complexe qui est le nôtre. Citons par exemple, à Paris, qui est devenu un lieu d'exposition tantôt permanent tantôt temporaire du Street art, « le totem solaire » de Da Cruz, rue des Périchaux dans le 15<sup>ème</sup> arrondissement.

La figure 2 montre, elle, une œuvre de l'américain John Perello (JoneOne en Street Art) réalisée en 2025 à Paris où il réside. Le choix des couleurs est raffiné et harmonieux. Surtout la conception de ces disques faits de sphères évoque, l'auteur le dit lui-même, un ensemble d'atomes ou de molécules. Autrement dit cette œuvre réalise directement la synthèse entre le thème des pavages artistiques et celui des structures atomiques ou moléculaires, une synthèse que nous avons déjà remarquée.



**Figure 2.** « *Fantaisie* » rue Vulpian Paris 13ème, une œuvre de John Perello qu'il qualifie lui-même d'atomique ou moléculaire.



**Figure 3.** rue Saint Laurent Paris 13 « *Snoopy part à la Manoeuvre* », une œuvre de Dark Snoopy, alias Joachim Romain (2018)

La figure 3 est un exemple un peu plus ancien (2018), elle représente « Snoopy à la manœuvre » et est due à Joachim Romain (Dark Snoopy en Street Art). Elle se relie directement aux pavages en ce sens qu'elle présente sur un fond de calligraphies orientales, un chien, de bandes dessinées, très occupé par la poursuite de cette décoration avec des techniques de plus en plus sophistiquées et modernes, en lisant le panneau de gauche à droite. Là encore l'artiste marie art traditionnel, celui de la calligraphie orientale, et histoire des techniques, avec un clin d'œil aux héros de bandes dessinées. C'est un peu la marque de cet art actuel, complexe et désireux d'appréhender notre monde dans sa complexité qu'est le « Street Art ». Là encore on retrouve une harmonie des couleurs sur une palette assez restreinte, une autre parenté avec ces références historiques.



**Figure 4.** rue Vergniaud Paris 13 « l'arbre de la connaissance » une œuvre de Philippe Baudelocque (2025).

La figure 4, une œuvre récente (2025) de Philippe de Baudelocque, est intitulée « l'arbre de la connaissance ». Elle se trouve sur la façade d'un hôtel dont l'intérieur est aussi décoré par le même artiste, toujours dans cet esprit de mélange de formes naturelles observées à des échelles très différentes, une référence à la réalité scientifique actuelle. Les couleurs, peu nombreuses mais fortes, insistent sur le détail du dessin très varié, très détaillé.

Ces trois figures montrent quelques perspectives d'un art urbain en pleine expansion, omniprésent dans la vie moderne, à la fois facile d'accès, gratuit, et aussi valorisé par des galeries. Le « Street Art » revivifie l'architecture comme un nouvel art décoratif en se référant aux possibilités scientifiques et techniques actuelles.

### 3.6.5. L'optimisation scientifique du pavage moderne

Et en un certain sens, ce jeu du pavage qui se situe entre science, technique et architecture s'est encore étendu avec, par exemple l'usage fréquent du logiciel « CATIA », dont l'acronyme signifie « Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée », un logiciel issu de Dassault industries, c'est-à-dire des techniques de l'aviation, autrement dit un apport scientifique mis au point dans les années 70. Ce logiciel adapté au pavage par des surfaces courbes de profils d'avion

mécaniquement stables, donc résistants aux conditions de l'aérodynamique, a été depuis largement utilisé en architecture par exemple pour concevoir le plan de la fondation Louis Vuitton établi par Frank Gehry (1926-2025) en 2014, tout comme les constructions complexes de Zaha Hadid (1950-2016), dont la tour CMA à Marseille. Cette brillante architecte a développé avec Patrik Schumacher une conception paramétrique des bâtiments, ce qui lui a permis d'arriver à des réalisations audacieuses dans le monde entier. A ce propos rappelons l'exposition « Zaha Hadid, une architecture » présentée à l'Institut du monde arabe en 2011.

Il faut ajouter que la pratique des logiciels en architecture est devenue, depuis cette époque, c'est-à-dire les années 70, chose courante, voire indispensable. Ce sont les logiciels du BIM (Building Information Modeling). Un exemple particulier d'une telle utilisation est le logiciel Revit utilisé par les architectes Tolila et Gilliland (titulaires de 2 équerres d'argent obtenues en 2022 et 2024) pour concrétiser les versions possibles de leur brique émaillée complexe et colorée qui fait toute l'originalité de leur construction d'un ensemble de boutiques du Miami Design District.

Dans un article paru en 2018 dans « l'avenir de la complexité et du désordre » paru aux éditions Matériologiques, et intitulé « complexité et désordre en peinture, architecture et urbanisme : vers une cité tridimensionnelle », je signalais aussi l'utilisation récente des pavages et des jeux de lumière. Parmi les exemples cités, on trouve la reconstruction du Havre par les frères Perret qui ont su utiliser des bétons de couleurs différentes pour briser l'uniformité d'une architecture industrielle et donc répétitive par principe.

L'église Saint-Joseph du Havre (1957) et sa tour lanterne de 107 mètres de haut donne un élan incontestable à cet ensemble. Surtout, dans cette église, les vitraux uniformément colorés de Marguerite Huré (1874-1967) apportent une dimension nouvelle aux pavages, par leur abstraction. Une telle initiative de décoration sobre des vitraux sera reprise notamment par Pierre Soulages (1919-2022) à l'abbatiale Sainte Foy de Conques en 1994, avec une version personnelle très reconnue.

Au-delà de ces versions très actuelles des pavages artistiques, il faut aussi considérer l'inspiration biologique de l'architecture, un autre rapport entre science et art.

### **3.7. Les nouvelles formes architecturales inspirées du végétal au Moyen Âge**

Revenons-en au Moyen Âge, déjà bien avancé, vers la fin de l'art roman. 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'arrivée de l'art gothique qui allège considérablement les édifices élevés que sont les églises, en jouant sur la stabilité de l'arc de cercle, qui devient ici l'arc de voûte ou l'arc boutant. On démontrera bien plus tard que cet arc de cercle est une structure mécanique optimale dans sa résistance et sa légèreté. Cette démonstration, on la doit à Robert Hooke (1635-1703) polymathe anglais, et notamment mécanicien, à qui l'on doit les bases de la théorie de l'élasticité et à Christopher Wren (1632-1723) architecte anglais aux multiples réalisations architecturales dont la cathédrale Saint Paul à Londres. Bien plus tard Pascal Monceau et moi-même avons montré que toute structure mécanique lacunaire avait tendance à se former en arc de cercle quand elle est soumise à une tension (*Physical Review B* **49** 1026 (1994))<sup>22</sup>, ce qui confirme l'universalité de ces formes arrondies ; une universalité bien observée dans la nature.

Avec la technique de l'art gothique on a atteint ainsi, lors de la construction de telles églises, des hauteurs comparables à celles des plus hautes pyramides, sans leur énorme masse et l'énorme chantier que ces réalisations nécessitaient alors. Ces monuments élégants évoquent aussi des formes végétales déformées par le vent. Cette propriété de biomimétisme correspond bien sûr à l'optimisation technique qui vient d'être notée. C'est évidemment aussi une propriété valable pour les végétaux dont les tiges se courbent élégamment sous le vent. Avec ce succès technique, l'essor de l'architecture gothique a été

<sup>22</sup> L'article s'intitule « *Monodimensional effects on elastic and vibrational properties of lacunary networks*”

immense jusqu'au gothique flamboyant qui se joue de la complexité en produisant un délire de courbes. Un exemple entre autres est celui du palmier, le pilier central entouré de ses multiples arcs, de l'église des Jacobins à Toulouse (1335), une église d'un gothique particulier. Cette église à double nef présente en effet un palmier complexe qui a inspiré à Salvador Dali, ce grand amateur de délires surréalistes, le fond du tableau « Santiago El Grande » réalisé en 1957 qui fait apparaître Saint Jacques en chevalier du moyen âge devant ce décor architectural inspirant.

Parmi les formes végétales qui ont marqué l'architecture ainsi libérée de ses traditions, de ses contraintes, on trouve aussi les bulbes, qui sont notamment imités dans les églises orthodoxes, et dont la mode s'est propagée très loin.

L'œcuménisme règne alors dans les arts et chez les artistes soucieux d'originalité, et les dômes orientaux des mosquées sont largement reproduits dans les églises catholiques occidentales. C'est le cas de la basilique Saint Marc de Venise (inaugurée en 1094) ou de la cathédrale Saint-Front de Périgueux (1170) ou encore de l'église Sainte-Marie de Souillac (1150), voire de l'église Saint-Pierre de Chauvigny. L'historien et archéologue de l'architecture Auguste Choisy (1841-1909) suppose même dans son « Histoire de l'Architecture », déjà citée dans la référence 21, que des artisans venus d'Orient ont été employés à l'édification de ces constructions originales, tout comme d'autres artisans orientaux ont participé en Europe à d'autres activités artistiques telles que la poterie et la céramique en y apportant à chaque fois leur touche originale et finalement une grande diversité de formes, comme on l'a vu à propos des azulejos. Ces nombreux échanges favoriseront la transition vers la nouvelle ère dont l'ouverture, cette fois mondiale, va se révéler exceptionnelle.

## 4. Art et science à l'ère industrielle

La transition vers la nouvelle ère est aussi progressive. On a l'habitude de faire débuter 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 (1394-1460), un prince portugais qui a développé la recherche technique autour de la navigation, avec même la réalisation de la « Caravelle », ce nouveau bateau exceptionnel de stabilité. Cette maîtrise scientifique et technique va, par ses nombreux résultats, obtenus peu à peu, avec l'aide de l'Espagne, complètement chambouler « l'Ancien Monde », par la découverte de nouveaux espaces et de leurs richesses, une découverte bientôt suivie par l'apport de quantité de produits nouveaux, et finalement par la mise en question à la fois des anciennes théories comme des pratiques traditionnelles.

Ce grand changement est étudié en détail sous ses multiples aspects dans l'ouvrage « Histoire du monde au XVe siècle », un livre collectif rédigé sous la direction de Patrick Boucheron et cité dans la bibliographie. A partir de ce succès, à l'origine technique, s'ensuit un engouement pour la science ainsi triomphante et un développement scientifique considérable qui mène par exemple à la construction de la 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 pour effectuer toutes sortes de travaux. Nous ne retiendrons ici encore que quelques fragments historiques choisis pour illustrer encore une fois le parallèle entre science et art. La considération de deux arts, la peinture et la musique s'impose alors, car, à l'évidence, ils mettent en jeu des propriétés scientifiques, l'optique et l'acoustique respectivement dont l'essor dès les débuts de cette période industrielle est très net.

### 4.1. L'impressionnisme

Une autre étape marquante de la peinture est le début de l'impressionnisme avec le tableau de Monet « Impressions, soleil levant » (1872) qui a donné son nom à cette importante école de peinture. L'explication du phénomène montré dans ce tableau et souvent photographié depuis : une traînée lumineuse de la largeur du soleil semble posée sur la mer agitée, relève évidemment de la physique. Pierre Coullet et Yves Pomeau ont essayé récemment de comprendre cette observation dans l'article

« *Light, water and physics in Monet painting* » paru dans « *European Physical Journal Web of Conferences* **244**, 01011 » en 2020. Leur interprétation, fondée sur l'étude de l'océanographe Walter Munk (1917-2019), tient au résultat de la somme statistique de la lumière de l'astre réfléchie par les multiples miroirs constitués par les nombreuses vagues de la mer agitée. Le résultat de leurs simulations confirme l'apparence de cette traînée de lumière sur la mer. Néanmoins, les espoirs d'interprétations des phénomènes marins à partir des observations faites depuis des satellites n'ont pas encore réussi. L'art donne des pistes aux scientifiques, mais certaines résistent aux investigations.

#### **4.2. Quelques exemples de dialogue entre musique et sciences**

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. La musique impose à l'homme son évidence naturelle avec le souffle du vent, le chant des oiseaux, les cris des animaux. Et la musique a été réellement pratiquée depuis longtemps par l'humanité comme en témoignent les nombreuses flutes préhistoriques retrouvées dans de nombreux sites. Pour faire de la musique, et surtout le faire de façon collective et de façon répétée, il faut obligatoirement une certaine codification commune, une règle, une écriture en quelque sorte qui fasse trace, référence. Et donc différentes codifications de la musique, proches dans leurs principes, mais un peu différentes entre elles, selon leur lieu d'exercice et selon l'époque de leur réalisation ont été produites et existent. Déjà la réalisation de flutes demande une expérience approfondie du son.

Revenons donc brièvement sur ces codes, avec ici une vue basée sur l'analyse spectrale des sons, une observation récente et puissante, dont les anciens n'ont eu qu'indirectement conscience, que ces sons soient émis par un instrument à vent, un instrument à corde ou une voix. Premièrement, ces observations ne sont pas toutes identiques, elles dépendent de nombreux facteurs comme l'intensité, l'instrument, le jeu de l'instrumentiste. Donc il faut s'attacher à leurs caractéristiques générales, en ayant aussi conscience de l'amplitude des variations de ces données.

La première observation montre que chaque enregistrement des fréquences des sons émis par un instrument met en évidence la présence d'un premier maximum, ce que l'on appelle la fréquence fondamentale, un maximum assez large, donc pas très bien défini. Ce maximum est suivi d'une série d'autres maximums à des fréquences qui sont (approximativement bien sûr, puisque le fondamental n'est pas parfaitement défini) à des multiples entiers de la fréquence fondamentale et que l'on appelle les harmoniques. Ce principe de répartition des fréquences principales fut observé depuis longtemps car plusieurs notes émises successivement ou simultanément peuvent posséder des harmoniques communes, ce qui produit à l'écoute un effet de résonance agréable, vite noté et recherché. Ces résonances ont permis de codifier la musique et tout bonnement de réaliser ces flutes dont les sons sont harmonieux justement parce qu'ils ont des harmoniques (approximatives) en commun.

Et cette codification de la musique ne date pas d'hier puisque l'on parle de la gamme pythagoricienne ! Pythagore (-580 ? - -495) est vraiment très connu pour de nombreuses activités d'une mathématique aux effets pratiques, très tôt. Cela prouve donc l'ancienneté de la musique, des musiques.

La fréquence approximative du fondamental de l'instrument correspond à ses propriétés de construction. Pour un instrument à vent, la distance entre le point d'émission du son et la première ouverture disponible sert à définir la longueur d'onde dans l'air du son émis et de là, la fréquence sonore. Pour un instrument à corde, la longueur de corde entre son point d'attache et l'autre point fixé par l'artiste ou l'instrument, sert à définir la longueur d'onde dans la corde et ensuite la fréquence sonore de l'instrument à corde, fréquence qui est transmise à l'air ambiant. Donc pour accorder l'instrument à vent et l'instrument à corde, il faut ajuster la tension de l'instrument à cordes, car on ne peut pas modifier la hauteur de la fréquence du son de l'instrument à vent.

Ensuite, pour un même instrument, il faut s'arranger pour que les sons successifs, les notes émises, aient entre eux des harmoniques communs pour procurer une résonnance agréable à l'oreille. Ce

problème mathématique a été résolu pratiquement de plusieurs façons approximatives, par exemple par Pythagore. Les résultats sont les gammes et les accords, ces successions de notes aux effets agréables. Du phonème qu'est la note, on est ainsi passé au mot. Comme on l'annonçait plus tôt, on obtient ainsi une écriture, une structure de sons successifs. Le plus simple des multiplicateurs entiers est 2, donc passer de la note de fréquence  $f$  à sa première harmonique, la note de fréquence  $2f$  est un point important, c'est la même note dans la gamme supérieure, ce qui définit la gamme. Du coup, pour optimiser les résonances entre notes par leurs harmoniques, on est conduit à ne faire intervenir que quelques notes dans la même gamme de fréquence c'est-à-dire dans l'intervalle  $[f, 2f]$ , dans des rapports simples de fréquence. Les choix optimaux sont évidemment approximatifs comme on l'a déjà noté, et ils ne sont pas très différents d'une civilisation musicale à une autre, ce qui permet des adaptations assez faciles d'une tradition à une autre.

La musique a donc réellement une vocation universelle, car, heureusement, les différentes traditions sont assez proches. En revanche son expression n'est pas très précise, alors que les langues comptent souvent de l'ordre de 100000 mots qui peuvent encore être précisés par des juxtapositions, des constructions, on ne peut pas distinguer aussi bien des motifs musicaux différents. Cela donne à la musique un statut particulier, à la fois universel et diffus. De fait, la musique a été associée très tôt aux religions en faisant partie de leurs activités, de leurs rites, avec ce statut à la fois solennel et distancié. Ce statut privilégié lui a aussi valu l'appréciation de riches mécènes qui entretenaient sa pratique, ses compositeurs et ses interprètes pour leurs divertissements. Les progrès techniques et sociaux de la révolution industrielle en marche, ont alors fait apparaître une bourgeoisie soucieuse de culture, de divertissement, et donc susceptible d'affranchir les musiciens de leur servitude vis-à-vis des établissements religieux et des mécènes. Et il faut aussi dire que les pratiques musicales se sont très tôt diversifiées, comme les instruments et les groupes musicaux et vocaux.

On est donc arrivés au point déjà abordé où les conversions entre les musiques de civilisations différentes deviennent nécessaires. Pour avancer encore cet état des lieux dans le passé récent, le présent et le futur, nous allons considérer quelques cas particuliers contemporains.

## 5. Trois cas particuliers entre arts et sciences

Après ce bref parcours qui montre la réalité et aussi les difficultés des échanges entre arts et sciences, nous allons montrer ici trois cas particuliers d'ouverture actuelle entre arts et sciences, des cas qui illustrent la richesse de cette thématique et ses espoirs. C'est une voie déjà existante et bien sûr à développer.

### *Jean-Marc Philippe (1939-2008)*

Jean-Marc Philippe avec une formation de scientifique (DEA de Géophysique) s'est très tôt tourné vers les arts en devenant peintre. La rencontre en 1984, lors d'une conférence scientifique, de l'exposé d'Alain Dubertret, chercheur au CNRS Vitry, sur les alliages à mémoire de forme alors utilisés dans l'aérospatiale pour déployer dans l'espace les photopiles nécessaires à la fourniture d'énergie des satellites, transportées sous un volume minimum dans les fusées, a changé sa vie. En effet, Jean-Marc Philippe s'est alors lancé dans un sérieux apprentissage technique auprès du constructeur américain de ces supports pour devenir sculpteur d'alliages à mémoire de forme, avec l'espoir, réalisé plus tard, de lancer de tels messages dans l'espace. Il avait aussi l'idée fructueuse de réaliser des sculptures à sens multiples, dont le sens pouvait varier selon la température de l'environnement, ce qu'il a aussi réussi. Ce parcours tout à fait exceptionnel ouvre des perspectives fructueuses de transfert des connaissances d'un domaine à l'autre.

### *LINKs*

LINKs est une revue créée par le critique d'art Louis-José Lestocart dans les années 2010 pour être le lien entre diverses activités artistiques et scientifiques, un lieu d'échanges, d'ouverture. Cette revue d'une quinzaine d'années d'existence a permis des rencontres assez exceptionnelles sur un art en création, en mouvement, à la pointe de la science et de la technologie. La réalisation de cette revue fut d'ailleurs un bouleversement pour ce spécialiste formé initialement en paléoarchéologie ! Un des nombreux artistes ainsi révélés par cette revue et ces échanges est Antoine Schmitt, un musicien rompu à de multiples techniques actuelles et en devenir.

### *Antoine Schmitt*

Antoine Schmitt a une formation d'ingénieur des télécommunications et après une carrière d'ingénieur a développé une activité artistique où l'image et le son générés par l'ordinateur occupent notre imaginaire en l'enrichissant d'expériences multiples. Il saisit, ou au moins tente de saisir toutes ces possibilités, ce qui est, malheureusement rare actuellement, en créant un spectacle aux multiples vies dans de nombreux lieux dont le musée Pompidou à Beaubourg.

Ces derniers exemples, tout comme les exemples plus anciens cités précédemment prouvent amplement la possibilité de la communication entre arts et sciences. Ces différents cas mettent tous en évidence plusieurs niveaux d'interaction sociale, un niveau individuel avec des capacités multiples, des goûts assez larges, un niveau intermédiaire susceptible de générer des rencontres rares comme dirait Granovetter, et enfin la nécessité d'un soutien plus permanent, d'un mécénat social en quelque sorte, qui permette la durée de tels trajets transverses et leur donne l'opportunité d'un épanouissement.

Le deuxième niveau d'interaction, la rencontre de thématiques, demande une création de colloques, de lieux d'exposition largement ouverts, et ceci selon une pratique régulière. Le troisième niveau demande quant à lui, un effort prolongé dans la durée : un accord de bourse sur des durées assez longues pour assurer le succès de telles entreprises, de longue durée, un réel mécénat, pour dépasser les aléas liés à de telles entreprises.

## **6. Conclusion**

Au cours de ce résumé historique, nous avons observé bien des échanges entre arts et sciences. Citons entre autres, la pratique de la self-similarité dans les pavages de l'art de l'islam, et ceci bien avant les fractals de Benoît Mandelbrot et l'étude des phénomènes critiques. De même les pavages de l'art de l'islam ont anticipé de plusieurs siècles l'étude des cristaux et des quasicristaux. Plus près de nous, Escher a su tirer parti des découvertes scientifiques et notamment de celles d'Henri Poincaré pour créer des dessins pleins de talent. L'exploitation des données géométriques des pavages a conduit à imaginer des structures architecturales légères et à leur tour des œuvres d'art dites en « tenségrité », et le tout est revenu en chimie avec la découverte des fullérènes ! Le Street Art sait aussi tirer parti de cette réflexion sur la structure intime de la matière pour décorer les murs et les villes. A leur tour les architectes utilisent des logiciels scientifiques pour réaliser leurs œuvres ! Et les alliages à mémoire de forme, récemment découverts, suggèrent un renouveau de la sculpture en proposant des statues dont la forme dépend de la température extérieure, voire d'un souffle.

Ces liens se produisent dans les deux sens et la question du développement de ces liens est ici posée d'après des expériences récentes. Cette question met en évidence le besoin d'une reconnaissance sociale de ce genre d'activité qui peut se révéler créatrice en sciences comme en arts.

## **7. Bibliographie**

[BRA 49] BRAUDEL F., *La Méditerranée et le Monde Méditerranée, à l'époque de Philippe II*, Armand Colin, Paris, 1949.

[BRA 81] BRAUDEL F., *Civilization and Capitalism 15th-18 th Century*, University of California, Berkeley, 1981.

- [BRA 88] BRAUDEL F., *The identity of France*, Harper and Row, New York, 1988.
- [CHO 64] CHOISY A., *Histoire de l'Architecture* Tomes 1 et 2, Éditions Vincent, Fréal & Cie, Paris, 1964.
- [JOF 79] JOFFROY R., *Musée des Antiquités nationales Saint-Germain-en-Laye Guide*, Éditions Réunion des musées nationaux, Paris, 1979.
- [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.
- [DEL 89] DELACOUR J., LEVY J.-C.S. (dir.), *Systèmes à Mémoire, une approche multidisciplinaire*, Masson, Paris, 1989
- [LEV 92] LEVY J.-C.S. (dir.), *Nouvelles Structures de Matériaux*, Masson, Paris, 1992
- [LEV 15] LEVY J.-C.S. (dir.), *Complexité et Désordre, éléments de réflexion*, EDP Sciences, 2015
- [LEV 18] LEVY J.-C.S., S. OFMAN (dir.), *L'avenir de la complexité et du désordre*, Editions Matériologiques, 2018
- [BOU 09] BOUCHERON P., (dir.) *Histoire du monde au XV<sup>e</sup> siècle*, Fayard, Paris, 2009.