



HAL
open science

CA -Creative Algorithm Recherche scientifique, technologique et création artistique

Stéphane de Gérando

► **To cite this version:**

Stéphane de Gérando. CA -Creative Algorithm Recherche scientifique, technologique et création artistique. 2011. hal-02943287

HAL Id: hal-02943287

<https://hal.science/hal-02943287>

Submitted on 18 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CA - Creative Algorithm

Recherche scientifique,
technologique et création artistique

Stéphane de Gérando¹
Chercheur associé à l'Institut d'esthétique
des arts et technologies, compositeur artiste
multimédia
IDEAT / FRE 3307
CNRS / Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Pour citer cet article : de Gérando Stéphane, « CA Creative Algorithm », 3icar /icarEditions, 2011.

OBJECTIF DE LA RECHERCHE

CA, Creative Algorithm, est un projet conjuguant recherche scientifique, technologique et création artistique. Outre l'aspect recherche, *Creative Algorithm* a pour objectif de devenir une œuvre algorithmique virtuelle interactive et poly-sensorielle. Nous abordons la première phase de développement du projet, avec une description des enjeux scientifiques et artistiques, une présentation générale des programmes informatiques et un premier bilan critique.

RAPPELS HISTORIQUES

Le projet CA tente de s'inscrire dans une perspective diachronique et critique, à la fois aux niveaux esthétique, historique et technologique.

L'art virtuel ou multimédia est à la préhistoire d'une évolution : les premières utilisations de l'ordinateur en lien avec le domaine esthétique (début des années 1960), l'apparition de la télévision et d'un art vidéo, puis un travail plus spécifique sur l'imagerie numérique avec les techniques d'acquisition, de simulation... jusqu'aux années 1980 qui rendent plus accessible l'utilisation grand public de l'informatique, avec le développement des micro-ordinateurs (IBM PC en 1981, les Macintoshs en 1983), le premier logiciel de graphisme ou les débuts de la 3D. C'est aussi la période du développement de l'interactivité temps réel ou du tout algorithmique (image entièrement calculé par ordinateur). Ces techniques se stabilisent dans les années 1990 avec une percée d'Internet et le World Wide Web en 1994. Le marché de l'art numérique se développe à partir de 2001, avec les premières galeries commerciales telles que le Walker Art Center ou le Whitney Museum of American Art ou des expositions comme en Allemagne *natürlich-künstlich* (naturellement artificiel) (2001, Rostock, Mannheim et Berlin).

¹ Stéphane de Gérando est chercheur associé à l'IDEAT CNRS Paris I, Docteur habilité à diriger les recherches, compositeur (Premier prix et 3e Cycle du Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris) et artiste multimédia. Enseignant et directeur de Centres de formation supérieure, directeur de l'IcarEnsemble, Stéphane de Gérando est à l'initiative de festivals liés à l'innovation et la création en France depuis 2006. Ses publications ont pour sujets la notion même de création et l'invention numérique de l'image et du son. Accompagné d'un disque monographique en collaboration avec Radio-France, un de ses derniers ouvrages, *Dialogues imaginaires* (Paris, Tschann, coll. « Inactuelles », 2010), retrace ce double parcours de compositeur et de chercheur.

La culture multimédia a cependant toujours aujourd'hui des difficultés à exister en dehors de ses réseaux spécifiques. Certains pays comme le Japon ou les Etats-Unis semblent être à une période charnière, profitant notamment du développement de cursus universitaires « appliqués » dans le domaine artistique avec des laboratoires de recherche dans le domaine du virtuel associé à l'Art. Le rapport Art-Science-Technologie de Jean-Claude Risset datant de mars 1998 explique la naissance de ce contexte, rappelant le rôle en France du Ministère de la Culture pour tenter de financer certaines recherches, ce ministère se heurtant par ailleurs « à des difficultés concernant structures et statuts »².

C'est en conséquence le sentiment d'une culture parallèle qui s'est développée, avec fraîcheur parfois et la naïveté de la découverte. Le développement des outils technologiques grand public, les champs expérimentaux, le lien avec d'autres disciplines, la mixité des genres et des moyens d'expression, autant de facteurs favorisant des nouvelles pratiques.

Dans ce contexte, CA tente modestement de retrouver certaines filiations, de réfléchir sur le lien entre histoire, outils techniques et imaginaires, de proposer des réflexions théoriques en relation en définitive avec la question artistique.

Prenons un exemple délicat, le cas de l'étude de la relation entre la fréquence d'un son et de la lumière, sujet qui intéresse nécessairement l'art virtuel polysensorielle. Naturellement dans le domaine des sciences, le sujet a été traité, d'Aristote à Kepler, du père Mersenne à Descartes, Huyghens, Hooke, Newton, Fresnel... Dans le domaine artistique, au XVIe siècle, Arcimboldo aurait créé un clavecin de couleurs partant des proportions harmoniques pythagoriciennes et un luth "perspectif" notamment. C'est le début d'une longue liste d'instruments tentant de lier les fréquences d'un son et de la lumière, le clavecin oculaire, oil-lamp device, colored-liquid Clavichord, Pyrophone, color organ, vacuum-tube Instrument, sound-color, Chromola, Clavilux, Sarabet, Piano Optophonique, optophone, Sonchromatoscope, colour Keyboard, Chromatophon, Lichtrequisit, Kinetic Light Machine, color projector, Musicolour Machine, Musiscope, Vortex Concerts, Sonovision, Lumidyne, Reflectodyne, Chromara, VAMPIRE...

Malgré ces travaux à travers les siècles, il ne semble pas actuellement y avoir de consensus scientifico-artistique définitif et clair à ce sujet. Nous avons l'impression d'être toujours à l'époque des pionniers, les solutions étant ponctuelles selon les expérimentations ou les personnalités qui les proposent. Le manque de résultat scientifique pose une véritable difficulté.

De manière plus général, les liens entre science et art restent délicats, appartenant à des logiques, des processus de validation, des cultures institutionnelles, sociologique et économiques différentes. La difficulté est de faire communiquer ces logiques sans les annuler, avec respect et dans un esprit à la fois de rigueur et d'ouverture.

² Jean-Claude Risset, Rapport Art-Science-Technologie, mars 1998.

LES DEBUTS DE CA

J'ai commencé à collaborer en 2006 avec un artiste peintre, Pierre Chaveau³, avec lequel nous avons travaillé sur une version multimédia de *Binaurale*. Une des particularités du travail de Pierre est de créer des peintures en mouvement, grâce à la projection de couleurs primaires sur ses toiles. Il parle lui-même de partition rythmique, qui contrôle l'intensité des trois faisceaux lumineux permettant une recomposition du spectre chromatique des couleurs grâce à la synthèse additive : alors que la toile est peinte sur un support « traditionnel », ses formes et couleurs se métamorphosent suivant l'éclairage projeté. Dans le cadre de *Binaurale*, il a réalisé une peinture à partir de la forme d'onde de l'œuvre électronique, puis j'ai réalisé une vidéo à partir de son travail, le tout créant une installation à trois dimensions simultanées avec la musique. Par la suite, j'ai composé *Blue bird* œuvre multimédia créée au Musée d'Aquitaine à Bordeaux et réalisée pour une projection monumentale, en extérieur et en intérieur. Au même moment, je commençais à travailler sur le concept de tableau virtuel, parfois même sans musique, image d'un objet à déformation lente jouant sur les seuils différentiels de perception.

Une création temps réel de l'image et du son

CA - Creative Algorithm – est une œuvre virtuelle interactive créée en temps réel, ce qui veut dire qu'elle n'a pas d'existence propre en dehors d'un programme informatique qui la représente. Entrepris en juin 2007⁴, ce projet dépasse le cadre traditionnel d'une composition, *CA* étant un concept artistique avec des implications pluridisciplinaires à la fois scientifiques, économiques et autres... L'œuvre se développe par étapes, par exemple sous la forme de partenariats institutionnels⁵. A long terme, l'objectif consisterait à inventer un monde artistique virtuel poly-sensoriel interactif.

Premiers objectifs

A l'origine du projet, je citerai cinq objectifs :

1. Développer une œuvre autonome, sans début ni fin, toujours différente (combinaison de processus déterministes et stochastiques).
2. Présenter chaque étape de l'écriture comme une version de l'œuvre, la phase de recherche et de développement n'étant jamais séparée d'un objectif

³ Diplômé ès-Lettres, Arts Plastiques et Sciences de l'art de la Sorbonne et de l'Ecole Nationale Supérieure des Beaux Arts de Paris (ENSBA), Pierre Chaveau déploie son activité comme peintre, illustrateur et auteur. En 1990, il invente l'« écriture lumière » qui explore le lien organique entre la couleur et la lumière et interroge les rapports avec le texte, la danse et particulièrement la musique. Depuis 1971, son œuvre a été régulièrement exposée en Europe, aux Etats-Unis et en Extrême-Orient.

⁴ Tony Héron, Rapport de recherche, formation d'ingénieur ENSEIRB, *Développement de programmes de contrôle temps réel du son et de l'image dans le cadre du projet CA - Creative Algorithm* – Développement sous MAX-MSP-JITTER, 3icar / icarEditions, 2007.

⁵ comme ce fût le cas lors de la première phase de développement avec l'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, Informatique de Bordeaux, l'Institut International pour l'Innovation la Création Artistique et la Recherche et le Festival de l'Innovation et de la Création au Musée d'Art Moderne et Contemporain de Toulouse.

- artistique avec l'idée d'un « tout algorithmique ».
3. Créer une invention de l'image et du son sans rapports hiérarchiques obligés (l'image ne dépend pas impérativement du son et inversement).
 4. Etablir des relations fortes entre les modèles de synthèse choisis, comme la synthèse additive pour l'image et le son, en favorisant la puissance de ce type de modèle généraliste⁶ et les possibilités de contrôle⁷.
 5. Envisager « un cœur » rythmique, symbole d'un centre névralgique envoyant une multitude d'impulsions, durées très courtes, quanta de temps propres à contrôler et à composer rythmiquement l'évolution de l'ensemble des paramètres des différentes synthèses.

Description synthétique du programme

L'œuvre a été programmée dans l'environnement MAX-MSP-JITTER spécifiquement dédié au temps réel et à la création sonore et visuelle. La programmation graphique par module fonctionnel, l'architecture de l'environnement lui-même et les bibliothèques associées font que MAX est probablement le plus puissant et le plus stable des logiciels actuels pour ce type de développement.

A son ouverture, la programmation de CA se présente en trois zones distinctes : une première zone dédiée au son et à l'élaboration du synthétiseur, une deuxième consacrée à la synthèse de l'image et une troisième réunissant les programmes de contrôle de l'image et du son.

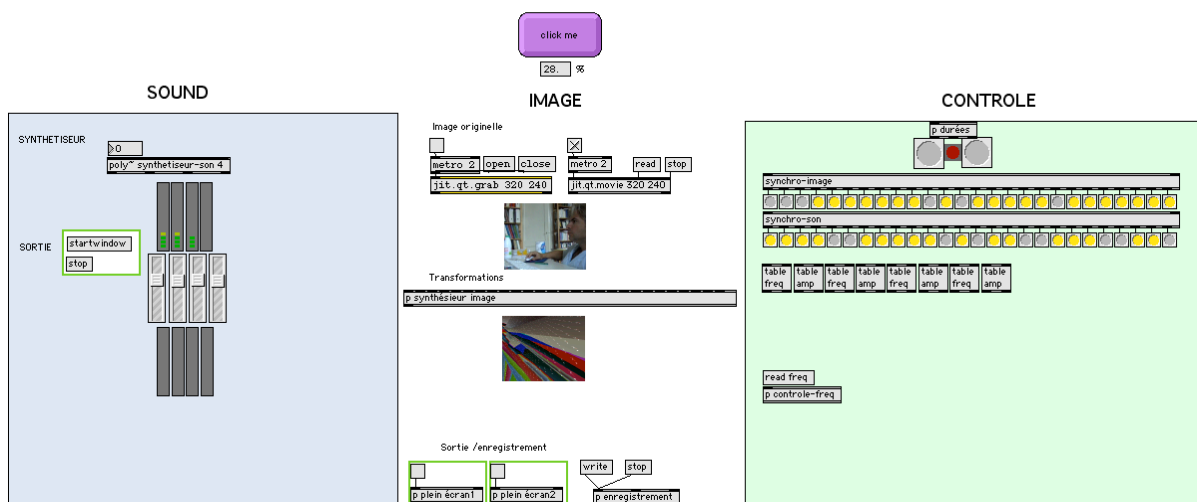


Figure 1 : Interface utilisateur de CA réalisée dans Max-MSP-JITTER

Je souhaitais utiliser mes recherches précédentes dans le cadre de la synthèse sonore afin de réaliser un synthétiseur polyphonique « hybride », sur la base d'un modèle additif lié à d'autres techniques de synthèse comme des modulations (amplitudes, fréquences, phases), des programmes de traitement

⁶ création de tous types d'image et de son.

⁷ interne à l'objet synthétiser (son....) et de nature procédurale : composition et non déformation ou manipulation du son, de l'image.

(filtrages, réverbération, spatialisation...), des synthèses par formes d'onde mixées.... L'invention de tout type de timbre est ici réalisée grâce à l'addition d'oscillateurs associés individuellement à 16 paramètres de contrôle⁸.

Je comptais utiliser le même modèle de synthèse pour l'image, avec un contrôle systématique de chaque pixel. Cette option allait devenir trop laborieuse⁹ à réaliser dans le temps prévu pour cette première phase de développement (trois mois). Le choix s'était porté en définitive sur la visualisation du public filmée et transformée en des tableaux virtuels abstraits. L'image du visiteur se trouvait reflétée dans l'œuvre, ses gestes déformant les formes du tableau devenu interactif. Cinq programmes participaient à cette modification de l'image: un fractionnement et déplacement en cellule basés sur la luminance¹⁰, un effet de modification du taux d'échantillonnage sur l'image¹¹, une combinaison de matrices¹² et une spatialisation associé un mixage automatisé de ces différents traitements¹³.

De manière plus général, pour contrôler l'évolution rythmique de l'ensemble des paramètres des différents modèles de synthèse de l'image, du son..., l'objectif¹⁴ était de produire une succession de durées¹⁵ à partir d'un contrôle probabiliste ou déterministe d'échelles de durées définies¹⁶ grâce à un processus d'auto-modification des données en fonction du résultat de l'évolution de l'œuvre. Le programme offrait aussi un contrôle de la perception à la fois continue ou discontinue du temps (monnayage ou subdivision des durées), régulier (temps pulsé) et irrégulier de la pulsation (temps lisse) par exemple. Cette matrice virtuelle déjà complexe représentait à la fois l'unité et le cœur du système. A partir de cette voie virtuelle non obligatoirement perçue, nous allions générer une superposition de déclenchements ou durées grâce à des principes de synchronisation /désynchronisation des voies de contrôle de la totalité des paramètres des modèles de synthèse. Ce programme symbolise « l'intelligence » du système, suffisamment généraliste pour être complexifié puis appliqué sur lui-même¹⁷ et au contrôle de tous les paramètres de l'écriture de l'œuvre comme la composition du timbre et son évolution, des fréquences, des durées, des dynamiques, de la spatialisation... Pour simplifier, à un instant t , le programme sélectionne un nombre ou plusieurs nombres parmi un ensemble de nombres déterminés. Plus précisément, l'algorithme exécute

⁸ Liste des 16 paramètres de la synthèse du son à contrôler en temps réel sur chaque oscillateur (sinusoïdale ou autres) : p1 : forme d'onde, p2 : amplitude (avec enveloppe), p3 : phase, p4 : fréquence du vibrato p5 : amplitude du vibrato, p6 : fréquence du jitter, p7 : amplitude du jitter, p8 : fréquence du vibrato, p9 : amplitude du vibrato, p10 : coef. Amp, p11 : fréquence du jitter, p12 : amplitude du jitter, p13 : coef. Amp, p14: durée réverbération, p15 : mixage, p16 : panoramique.

⁹ limite de la puissance de l'ordinateur et autres...

¹⁰ *Jit.plume* prend deux matrices en entrée, analyse chaque cellule de la seconde matrice et, se fondant sur la valeur moyenne de ces dimensions, déplace la cellule correspondante dans la première matrice.

¹¹ *Jit.ameba* (nom du programme) sature de l'image par une augmentation ou une diminution du taux d'échantillonnage spatial.

¹² *Jit.eclipse* combine deux matrices à quatre dimensions (canal alpha, rouge, vert, bleu) en entrées selon des modes différents d'interaction.

¹³ A partir de deux matrices, *Jit.mxform2d* produit une seule et même matrice. Un second objet *Jit.xfade* mixe ces deux matrices.

¹⁴ « p durées ».

¹⁵ déclenchements ou « bangs » dans le langage MAX.

¹⁶ Chaque version de *CA* doit pouvoir facilement intégrer une complexification des algorithmiques de création d'échelles de hauteur et des procédures de sélection des durées.

¹⁷ dimension fractale du processus que l'on peut « emboîter à l'infini » à l'intérieur de lui-même.

un tirage pseudo-aléatoire à partir d'un ensemble de valeurs définies (x) selon des probabilités d'apparitions (y). Mais pour éviter de stocker ou de déterminer une succession d'états probabilistes à l'image des chaînes de Markov, chaque tirage modifie au même moment les paramètres du tirage, en faisant évoluer selon le contexte X et Y¹⁸. C'est comme si les conditions d'existence de l'œuvre étaient en perpétuelle évolution, le système évoluant avec le matériau de l'œuvre dans un jeu d'interaction temps réel : c'est ce que je nomme le processus d'auto-modification des données de contrôle de CA.

Comme interface graphique permettant de visualiser en temps réel la modification des échelles (x et y), je favorisais l'utilisation des « tables » au centre du processus itératif¹⁹, plus de cinquante pour l'ensemble de l'œuvre. Traduisant le concept d'auto-modification, le tirage pseudo-aléatoire était conditionné par dix autres paramètres à déterminer et présentés ici en trois catégories. Voici la liste des paramètres de ce programme qui permettent de contrôler l'évolution des échelles et des valeurs tirées²⁰. Comme à d'autres niveaux de composition de l'œuvre, des notions de continuité /discontinuité étaient contrôlables. L'auto-modification des tables rendait possible la succession d'échelles proches ou éloignées grâce à une définition des valeurs communes des échelles, un contrôle de l'écart de distorsion entre la valeur tirée et la nouvelle valeur de l'échelle...

Avec ce simple programme, la complexité de CA pouvait très vite devenir exponentielle et « incontrôlable ». Imaginons un instant qu'à chacun de ces dix paramètres de contrôle, j'applique l'intégralité de ce même programme et qu'à l'intérieur de ces cent nouveaux paramètres de contrôles, je réitère l'opération à l'infinie...

Dès les premiers tests d'utilisation de CA, il m'avait semblé nécessaire d'introduire un régulateur²¹, sorte de contrôleur surveillant l'entropie²² du système à

¹⁸ échelles initiales et condition du tirage pseudo-aléatoire.

¹⁹ objet MAX figurant graphiquement le tracé d'une courbe.

²⁰ Modifications des valeurs de y (probabilités non nulles) associées aux valeurs de x

p1 : nombre de valeurs de x modifiées

p2 : coefficient de déformation de y (ajouté ou soustrait à la probabilité de la valeur tirée)

p3 : activé = probabilité modifiée jamais nulle

Ajout de valeurs de x

p4 : nombre de valeurs x ajoutées

p5 : valeur de déformation de x (ajouté ou soustrait à la valeur tirée)

p6 : non activé = expansion de l'échelle des valeurs de x en fonction de p5

activé = ambitus du filtrage à déterminer (p7 et p8)

p7 : minimum de l'ambitus de filtrage des valeurs de x

p8 : maximum de l'ambitus de filtrage des valeurs de x

Mise à zéro de la probabilité d'apparition des valeurs de x (« éliminer » les valeurs de x)

p9 : nombre de valeurs éliminées (probabilité de la valeur tirée mise à 0)

Limite d'expansion supérieure des valeurs de x

p10 : valeur maximale possible de x (grandeur de la table associée aux paramètres de la synthèse)

²¹ Présentation générale

Addition ou soustraction de valeurs de x (y non nul) de façon continue ou discontinue selon un test lié au nombre de valeurs de x (si $x < \text{val-min}$ ou $x > \text{val-max}$)

Paramètres de contrôle

p1 : nombre minimal de valeurs de x possibles (probabilité non nulle)

p2 : nombre maximal de valeurs de x possibles (probabilité non nulle)

p3 : table définissant l'ambitus de variation des valeurs de x (par addition de vals), continu (entre le minimum et le maximum de la table associée) ou discontinu (entre 0 et la taille de la table associée) (0 ou 1) (table « cmd2 »)

travers par exemple une mesure du nombre de paramètres utilisés ou modifiés en temps réel dans des ambitus limites définis par l'utilisateur.

UN PREMIER BILAN

L'imaginaire de l'œuvre et sa composition sont ici bouleversées : il n'est plus question de composer un objet déterminé représentant l'œuvre, mais le compositeur invente les conditions d'existence d'une œuvre chaque fois différente, à la fois localement et globalement. On voit clairement l'impact des nouvelles technologies dans la façon de renouveler le concept d'écriture, en nous renvoyant au vieux rêve d'une « cyberœuvre » décidant, indépendamment de son créateur, de son existence éventuelle, de son évolution et de sa fin.

La définition d'une œuvre inachevée crée une nouvelle expérience : projeter l'imaginaire de l'œuvre en dehors de l'objet lui-même. Dans une configuration classique, le compositeur par exemple imagine l'œuvre dans un temps limité équivalent au temps de l'écriture : d'habitude entre quelques jours et quelques années. Mais l'œuvre dont il est ici question étant par définition en développement permanent, la première étape de son écriture se mesure à l'échelle d'une vie. Il faut apprendre à gérer ce nouveau rapport au temps en relation avec l'imaginaire, afin que l'œuvre ne devienne pas la marque d'une addition simpliste dépendant d'une évolution stylistique de l'artiste ou des programmes successifs de recherche.

De manière plus technique, l'accroissement de la complexité de l'algorithme est difficile à maîtriser, par manque de culture liée à cette entreprise et plus encore, dépendant de la nature du projet. Le programme MAX et de manière générale, la programmation graphique par module fonctionnel semble manquer d'efficacité à ce niveau, entraînant une difficulté de relecture des programmes complexes (liens et niveaux d'encapsulation). D'un autre côté, si écrire un programme efficace n'est pas simple, maîtriser son application est tout aussi complexe... L'accroissement d'une complexité de nature purement calculatoire pourrait appauvrir l'œuvre, si la perception ne reste pas au centre d'une relation entre l'algorithme et la dimension artistique du projet. Sur une durée de développement aussi longue, cela pose le problème de l'évolution des technologies, rendant la période très instable. Dans le domaine de l'image, cette question est flagrante : entre la multitude de formats, compressions et les évolutions très rapides²³, l'œuvre est exposée à un réseau de contraintes techniques extrêmement puissant qui fragilise profondément sa pérennisation et probablement aussi sa conception. Il y a en conséquence une nécessité de l'adapter à chaque contexte, voire de la reformuler : cela prend

p4 : table définissant la variation de valeurs de x (selon p1 et p2) (par addition ou soustraction), continue (limite la plus proche) ou discontinue (limite la plus lointaine) (0 ou 1) (table « cmd3 »)

²² mesure du désordre.

²³ le temps réel le temps différé, les modes ou supports singuliers de communication (ordinateur, DVD, internet, disque multimédia...) et de visualisation (télévision, vidéo projection, ordinateur...), les cadres d'exploitation ou de création (vente publique, installation muséale, recherche)...

beaucoup de temps et demande encore aujourd'hui d'avoir des moyens financiers²⁴.

Reste une ultime question: est-il raisonnable de réduire la création à une dimension purement algorithmique ? Si un processus automatique peut engendrer un imaginaire singulier, il a aussi tendance au même moment à enfermer et réduire l'imaginaire de l'œuvre au sein même du programme²⁵ : il existe à notre époque un réel danger à confondre l'intérêt de l'œuvre avec le programme ou la démarche du compositeur.

Nous avons à notre époque l'occasion d'inventer un métalangage propre à unifier l'écriture d'un matériau poly-sensoriel interactif en milieu immersif, passer avec cohérence d'un son, à une lumière, une odeur, pénétrer et interagir avec l'œuvre en trois dimensions, quatre avec le temps (écriture de l'espace temps), pour mieux se perdre dans les abîmes de la composition /décomposition de la matière. L'évolution d'une écriture artistique passe par le renouvellement du matériau, comme l'écriture du timbre depuis le XVIIe siècle ou la micro-tonalité au XXe siècle.

Pour envisager un lien entre l'interaction de la lumière (phonons), du son (photons) et de l'observateur (spectateur – acteur de l'œuvre), nous définissons actuellement avec Roland Triay - astrophysicien Professeur au Centre de Physique Théorique du CNRS Université de Marseille - au moyen d'un tableau de correspondance, les notions élémentaires physiques nécessaires à la description de scènes naturelles par des objets musicaux-visuels (OMV), l'objectif étant de décrire des scénarii pouvant mettre en application ces concepts afin d'estimer leur degré de pertinence. Trois niveaux de compréhension du monde physique sont représentés : quantiques, macroscopiques et cosmologiques, chacun lié à une échelle qui lui est propre. La description de certaines scènes macroscopiques identifiables doit aider à se familiariser avec ces OMV, cet apprentissage permettant de découvrir les phénomènes liés à des scènes caractéristiques aux autres échelles, singulières car n'ayant pas d'interprétation macroscopique.

L'époque où l'artiste écrivait une œuvre fixe à interpréter est ici révolue. Produit d'un algorithme, l'œuvre détermine seule son existence chaque fois différente en interagissant avec son environnement : l'artiste créateur n'invente plus l'œuvre, mais les conditions d'une existence multiple, entre hasard et déterminisme, entre mondes virtuels et représentations du réel...

Les liens entre Arts, Technologies, Sciences et autres disciplines..., la complexification conceptuelle de la création, les moyens associés, les synergies mises en œuvre pourraient traduire une des plus belles aventures de cette prochaine décennie, en transformant notre appréhension sensible du monde.

²⁴ Pour prendre un exemple simple, un ordinateur de dernière génération a mis plus d'une semaine jour et nuit pour calculer l'image de synthèse de Blue bird. Pour réaliser cette même vidéo dans un format haute définition, il faudrait reproduire ce calcul avec une durée encore beaucoup plus importante, sans parler des versions internet possibles, non compressées... Je souhaiterais connaître une période technologiquement plus apaisée, qui permettrait davantage de s'attacher à des questions de fond, même si cette période est aussi le signe d'une mutation passionnante.

²⁵ Dans l'ouvrage intitulé *L'Univers dans une coquille de noix* (Paris, Odile Jacob, 2001, p. 165), Stephen Hawking rappelle que le cerveau d'un simple ver de terre surpasse le plus puissant des ordinateurs, même si la croissance exponentielle des microprocesseurs laisse entrevoir de nouveaux horizons (de 3500 en 1972 à 400000000 opérations à la seconde, marque Intel). Selon la « Loi Moore », la vitesse et la complexité des ordinateurs doublent tous les dix-huit mois. En supposant que le compositeur devienne un expert de haut niveau en programmation, j'ai tendance à penser que nous sommes encore aujourd'hui à la préhistoire d'une nouvelle aire technologique, certaines capacités neurophysiologiques étant très loin d'être approchées ou imitées malgré les performances déjà singulières des machines en termes de rapidité et de fiabilité.