

Émergillience II

Sophie Lavaud¹

Artiste et théoricienne en Arts visuels et numériques interactifs, Ph-D Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne

RÉSUMÉ. Le projet artistique *Émergillience* se propose d'explorer les conditions pour l'émergence de formes par des phénomènes d'auto-organisation. Émergence et auto-organisation étant deux notions clés dans la simulation des systèmes complexes. Pour cela, il est fait appel à des outils de modélisation informatique de modèles scientifiques connus ou possiblement réinventés. S'inscrivant dans une certaine continuité historique – que l'on peut faire remonter aux avant-gardes du début du XX^{ème} siècle et qui cherche à intégrer à l'œuvre le processus vital plutôt que son résultat – la recherche se matérialise par la réalisation d'une série d'animations sous forme de programmes exécutables. Les premières animations génératives réalisées permettent d'observer, au cours du temps, la sensation d'auto-organisation du système qui évolue et finit par se stabiliser en acquérant de nouvelles propriétés. Le recours à des outils de modélisation et de simulation permet d'explorer une palette de règles de comportements individuels et locaux des éléments (appelés « agents » dans le contexte computationnel) menant à l'émergence de phénomènes collectifs et globaux, lesquels peuvent rendre compte d'états relationnels plus ou moins stables. Micro-univers en perpétuelle évolution, ces animations sont appelées des « Tableaux-systèmes dynamiques infinis » qui, selon le principe d'autopoïèse, se verront enrichis de capacités de résilience dans le développement futur du projet. La visée d'un tel projet étant, à terme, d'envisager l'écriture d'un traité de modélisation de « Tableaux-systèmes dynamiques infinis », sorte de pendant cybernétique à la théorie des formes telle que l'a construite W. Kandinsky pour la peinture.

ABSTRACT. The artistic project *Emergillience* aims to explore the conditions for the emergence of forms through phenomena of self-organization. Emergence and self-organization being two key concepts in the simulation of complex systems. This is done using computer modeling tools of known or possibly reinvented scientific models. As part of a certain historical continuity - which can be traced back to the avant-gardes of the early 20th century and which seeks to integrate into the artwork the vital process rather than its result - the research is materialized by the realization of a serie of animations in the form of executable programs. The first generative animations that were created, make it possible to observe, in the course of time, the feeling of self-organization of the system which evolves and ends up stabilizing itself by acquiring new properties.

The use of modeling and simulation tools allows to explore a palette of rules for individual and local behavior of elements (named « agents » in the computational context) leading to the emergence of collective and global phenomena, which can express more or less stable relational states. Micro-universes in perpetual evolution, these animations are called "Endless Dynamic Painting-Systems" which, according to the principle of autopoiesis, will be enhanced with resilience capacities in the future development of the project.

The aim of such a project being, in the long term, to envisage the writing of a treatise on the modeling of " Endless Dynamic Painting-Systems ", that will be a sort of cybernetic counterpart to the theory of forms as elaborated by W. Kandinsky for painting.

MOTS-CLÉS. Art, peinture, numérique, science, infographie, système complexe, Intelligence Artificielle.

KEYWORDS. Art, painting, digital, science, computer animation, complex systems, Artificial Intelligence.

1. Présentation du contexte du projet *Émergillience*

1.1. *Préambule*

Je présente ici un travail artistique sur l'émergence de formes par des phénomènes d'auto-organisation.

J'ai eu l'occasion de m'intéresser à l'Intelligence Artificielle (IA), aux systèmes complexes et à leur modélisation, puis, par la suite, aux phénomènes d'émergence et d'auto-organisation dans le cadre d'une résidence d'artistes *La Villa Media* à laquelle j'ai été invitée en 2003. L'idée proposée consistait à réaliser un travail sur « La peinture conçue comme organisation vivante », ce qui m'a conduite à produire des « Tableaux-systèmes dynamiques ». C'est-à-dire une modélisation d'un tableau peint en simulation numérique vivante et sociable, qui répond au spectateur grâce à des capteurs de position et de mouvement. La simulation 3D représente le monde du peintre comme un système complexe dont la dynamique est conçue comme auto-organisation émergente où les

éléments du tableau interagissent entre eux et avec l'utilisateur. Les interactions endogènes dans la simulation sont fondées sur un modèle physique qui maintient les éléments dans une position d'équilibre dynamique, laissant l'utilisateur créer et transformer de nouvelles compositions. Ainsi, chacun peut définir différents états du tableau qui produisent de nouvelles constructions sémantiques dans un processus collaboratif avec la peinture. C'est à l'occasion de cette résidence d'artistes qui s'est déroulée à Grenoble, que j'ai rencontré Yves Demazeau, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe de modélisation et de simulation de systèmes à base d'agents (appelés aussi Systèmes Multi-Agents ou SMA) à l'université Joseph Fourier de Grenoble, et Président de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA). Nous avons travaillé au projet de recherche artistique que j'ai conçu, *Matrice Active*, et c'est à cette occasion que j'ai pu expérimenter artistiquement pour la première fois ces phénomènes d'émergence dans l'une de mes œuvres emblématiques, le « Tableau scénique n°1 » (Fig.1). Sa dernière version, intitulée « Tableau scénique 2.0 » (Fig.2 et 3), modélise un célèbre tableau de Kandinsky, « Jaune-Rouge-Bleu » et le rend « vivant » grâce aux interactions des éléments modélisés qui le composent. En effet, ces éléments (les « agents » du système computationnel) interagissent entre eux et avec l'environnement dans lequel ils sont « situés » ainsi qu'avec le lecteur de l'image-système. Les comportements des éléments-agents, leurs interactions et les dynamiques créées donnent lieu à la visualisation de phénomènes qui se développent dans la durée. Ce sont, par exemple : des sensations de course-poursuite par des jeux d'attraction-répulsion, l'évolution du système vers une topologie proche de la composition arrêtée par Kandinsky comme forme finale de son tableau, l'intervention gestuelle du lecteur comme un des éléments du « système », qu'il co-construit ou déconstruit en l'amenant à différents « états » stabilisés selon divers degrés d'ordre ou de chaos. Avec le projet *Matrice Active*, j'ai pris conscience pour la première fois de l'enjeu qui deviendra le leitmotiv de mes créations ultérieures dont fait partie le projet *Émergillience* : la mise en place d'un nouveau paradigme dans le domaine de la peinture. Celui du passage d'une économie de la représentation fondée sur les lois d'organisation du *Point et de la Ligne sur un Plan* (Kandinsky, 1991) à celle d'Agents en Interaction dans un Système Complexe (Lavaud-Forest, 2012, p. 328-336).



Fig. 1. Tableau scénique n°1 de Sophie Lavaud – Modélisation des éléments du tableau Jaune-Rouge-Bleu de W. Kandinsky – 1^{ère} version – Capture d'écran.

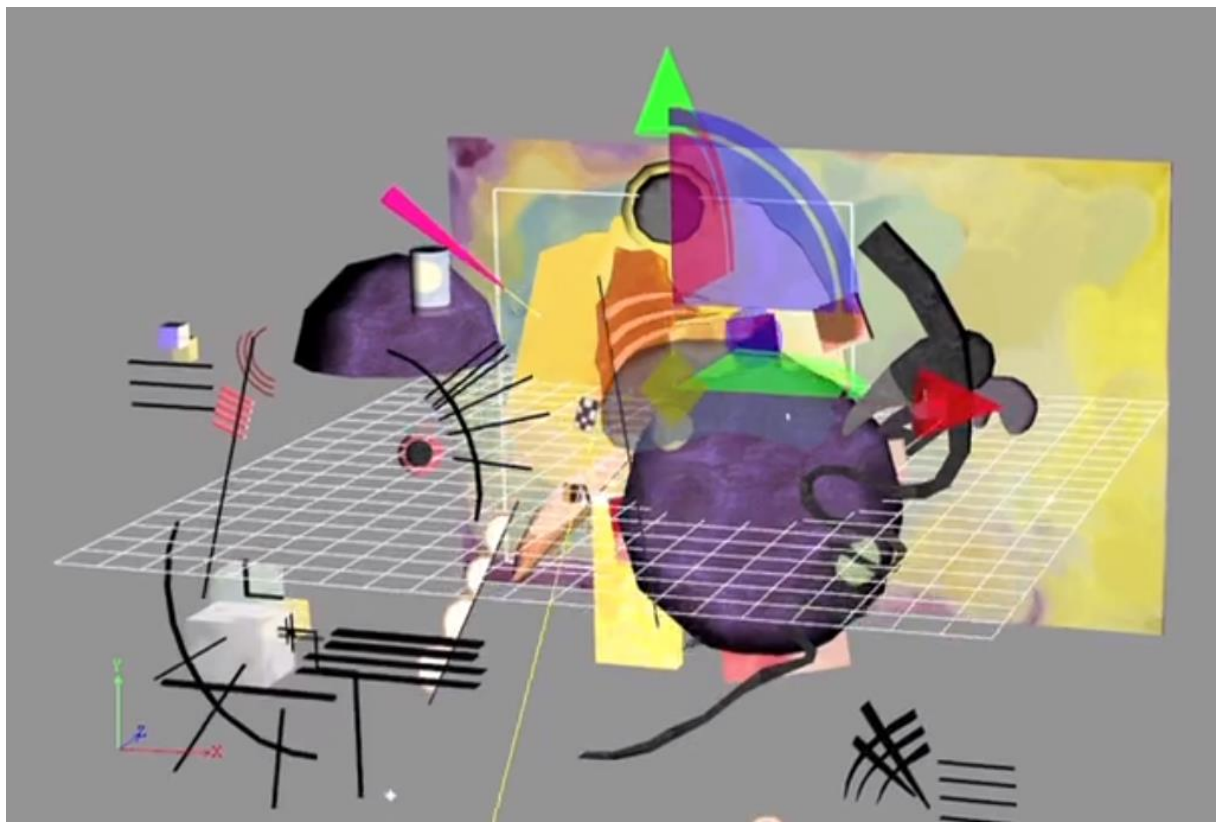


Fig. 2. Tableau scénique 2.0 de Sophie Lavaud– Modélisation des éléments du tableau Jaune-Rouge-Bleu de W. Kandinsky en une scène 3D – 2^{ème} version – Capture d'écran.



Fig. 3. Tableau scénique 2.0 de Sophie Lavaud – Un spectateur interagissant avec la dynamique du tableau. Photo de l'installation à Futur en Seine 2011 – Paris.

1.2. Les enjeux artistiques

Le projet *Émergillience* s'inscrit donc dans la poursuite de mes recherches qui visent à mettre le medium « peinture » et la notion de « champ pictural » dans des perspectives renouvelées. J'explore en effet, depuis une petite trentaine d'années, comment certaines technologies, telles que la Réalité Virtuelle, la 3D temps réel ou les animations procédurales associées à certaines approches scientifiques de programmation informatique, peuvent élargir les problématiques qui ont toujours été celles de la peinture et que je condense ici en ces quelques mots : qu'est-ce que percevoir ? L'histoire de la peinture ne peut-elle pas effectivement se résumer à une vaste et longue interrogation sur l'acte de percevoir ? Et, en conséquence, sur son corollaire logique : qu'est-ce que la réalité ?

Pour tenter de répondre à ces questions, les créateurs ont inventé des systèmes de représentation, ce qui suppose des techniques, des modèles et des théories. Plus que de simples outils nous permettant de continuer à faire évoluer le spectre de nos connaissances – ce qui est déjà important –, ces systèmes correspondent à une certaine vision du monde et de la position qu'y occupe l'homme à une époque donnée de son histoire. Pour l'art, ces systèmes relèvent de productions symboliques, pour reprendre la terminologie d'Erwin Panofsky (Panofsky, 1975). Pour ce dernier, l'art est en effet une « forme symbolique » et l'histoire de l'art, l'histoire des changements des différents systèmes de formes symboliques. L'étude de ceux-ci relève de ce qu'il nomme « iconologie » et qui inclut une perspective sociale et historique.

1.3. Un peu d'histoire de l'art

Afin de placer ce projet *Émergillience* dans une perspective historique et de montrer ainsi que, malgré les disruptions qui s'opèrent dans les techniques et les supports, une continuité téléologique persiste dans les préoccupations des artistes visuels, il me semble pertinent de faire ici une incursion dans l'histoire de l'art en partant du début du XX^{ème} siècle.

Les différentes avant-gardes du début du XX^{ème} siècle – notamment le Constructivisme Russe ou le Futurisme italien – ont clairement affirmé une volonté de transposer à l'art, non plus une copie des apparences de la vie, fondée sur la *mimesis*, mais une « construction » établie sur le principe vital qui cherche à conférer à l'œuvre un statut d'être vivant, et non plus d'objet inerte. La rupture assumée avec le passé se fait au niveau de la nature de l'œuvre et conséquemment, des relations établies avec elle, donc du statut et du rôle du spectateur. L'énergie de celui-ci est notamment requise pour participer à l'œuvre. László Moholy-Nagy (cité dans Popper, 1975, p. 23) écrit dans le *Manifeste des Forces constructives dynamiques*, publié en collaboration avec Zoltan Kemeny dans le magazine *Der Sturm* en 1922 : « La constructivité vitale est la principale manifestation de la vie et l'origine de toutes les pulsions humaines et cosmiques. Transposée dans l'art, elle signifie aujourd'hui la dynamisation de l'espace à l'aide de systèmes dynamico-constructifs, c'est-à-dire l'intégration des forces dans l'espace physique, effectivement antagoniques en leur distribution dans un espace qui se caractérise également par des forces ou des tensions... Si le principe de la construction individuelle et dynamique est prolongé, il donne lieu à un système de forces dynamico-constructives dans lequel l'homme, jusqu'alors resté passif dans la contemplation des œuvres d'art, voit ses facultés stimulées et devient lui-même un facteur actif des forces en expansion. »

En appliquant les principes dynamiques de la vie dans leurs œuvres (sans nécessairement y introduire le mouvement réel) plutôt que de créer des constructions statiques basées sur des formes fermées et figées, les artistes constructivistes ou futuristes cherchaient à dessiner des « structures » comme des machines mais des machines comme des systèmes dynamiques pour lesquelles la fonction de la matière est de transporter l'énergie. Ces conceptions se retrouvent aussi chez Oskar Schlemmer et Wassily Kandinsky, tous deux enseignants à l'Ecole du Bauhaus. Dans les expérimentations théâtrales d'Oskar Schlemmer et celles, moins connues, de Wassily Kandinsky –

qui rêvait de créer la scène « abstraite » afin de renouveler les paradigmes du théâtre de son époque –, la mise en espace scénique de la peinture permet de libérer les formes et les couleurs dans l'espace, et de les doter de mouvements réels, leur conférant la possibilité de s'animer, au sens de prendre vie dans des tableaux vivants sans cesse en devenir. Dans le *Triadic Ballet*, 1922 ou le *Ballet Mécanique*, 1927 d'Oskar Schlemmer, les configurations visuelles se font et se défont sans cesse sur la scène. Aussi, dans les *Tableaux d'une exposition*, un « *Gesamtkunstwerk*¹ » de Wassily Kandinsky réalisé à partir d'une composition musicale de Modeste Moussorgski, présenté au Friedrich Theater de Dessau en 1928, où les acteurs sont les couleurs, les formes, les mouvements et les sons, l'idée est d'ériger le concept de métamorphose en principe fondamental de l'art.

Plus tard Joseph Beuys, considérant les matériaux pour leurs propriétés internes plutôt que pour leur seul aspect externe, contribuera lui aussi, à situer « l'œuvre au centre d'un dispositif énergétique, au sein de ce que nous appellerions un "champ". Électrique, magnétique, calorique. » (de Mèredieu, 2004, p.499).

De nos jours, je considère que les œuvres susceptibles d'être conçues comme un organisme vivant, un système ouvert échangeant de l'énergie avec son environnement (Varela, 1989), peuvent être considérées comme le plein accomplissement de ce que les avant-gardes du début du XX^{ème} siècle (notamment au Bauhaus) ont contribué à mettre en œuvre : une hybridation des sciences et de l'art. L'œuvre de Wassily Kandinsky s'inscrit parfaitement dans cette logique et sa pensée théorique anticipe même l'accomplissement des bouleversements en cours en préparant la venue de l'ère digitale. En 1926, il écrit : « En somme, toute force peut se traduire en chiffres, ce que nous appellerons formule numérique. Pour l'art ce n'est actuellement qu'une assertion théorique, qui, toutefois, n'est pas à négliger : nous manquons aujourd'hui de possibilités de mensuration, mais elles ne sont pas utopiques et seront trouvées tôt ou tard. A partir de ce moment, toute composition trouvera sa formule numérique, même si au départ elle ne correspond qu'au « tracé » et aux grandes lignes. La suite est une question de patience qui aboutira à une division des grandes composantes en ensembles numériques de plus en plus petits. On ne pourra réaliser un traité de composition précis, que nous entrevoyons aujourd'hui, que lorsque nous serons en possession de la formulation numérique. » (Kandinsky, 1991, p.111-112). La référence *a posteriori* au pixel ou au bit, sous la métaphore des « ensembles numériques de plus en plus petits », me semble évidente.

Avec l'arrivée de l'informatique, de la machine de Turing, des ordinateurs et des possibilités qu'ils offrent de concevoir des modèles permettant d'appliquer, de manière effective, les principes et théories scientifiques, notamment dans le domaine des sciences du vivant, des champs d'exploration infinis se sont ouverts à la création artistique.

Une nouvelle matière est désormais à disposition : celle de l'information, de l'impulsion électrique et électronique. Ce que Florence de Mèredieu résume assez bien dans ces termes : « Les développements de la technologie, l'intervention croissante des machines dans la réalisation de l'œuvre d'art et plus encore dans sa conception (art assisté par ordinateur) conduisent à réenvisager totalement la notion même de matière ou de matériau artistique. Entendue non plus comme substance – visible, pesante, étendue – mais comme onde, énergie, ou corpuscule, la matière se voit peu à peu dématérialisée. » (de Mèredieu, 2004, p. 486).

La « formulation numérique » que Wassily Kandinsky, le visionnaire, avait pressentie, est là et elle permet de réaliser, en grande partie, les promesses et les espérances des avant-gardes du début du XX^{ème} siècle. « Plutôt que d'imiter les apparences, il s'agit d'en simuler les structures sous-

¹ Le terme est attribué au compositeur et chef d'orchestre allemand Richard Wagner pour désigner une « œuvre d'art total ».

jacentes, les processus internes qui les engendrent. » (Duguet, 2002, p. 187). C'est là tout l'enjeu de la modélisation sous-tendue par des modèles « abstraits » logico-mathématiques, que Edmond Couchot et Norbert Hillaire décrivent ainsi : « Ces innombrables modèles ont ceci de particulier qu'ils ne visent pas à représenter le réel sous son aspect phénoménal, mais à le reconstituer, à le synthétiser, à partir de lois internes et des processus qui le structurent et l'animent – bref à le simuler. Ce sont des modèles de simulation. » (Couchot et Hillaire, 2003, p. 27).

Avant de passer à l'étude des modèles de simulation à l'œuvre dans le projet *Emergillience*, il me semble important de continuer mon incursion dans l'histoire des arts en mentionnant des formes artistiques qui, avant même les possibilités technologiques numériques, marquent un saut important dans la façon dont nous concevons l'espace. La « mathématique théâtrale » d'Oskar Schlemmer ou de Wassily Kandinsky opérant, comme nous l'avons vu, au Bauhaus, pour un « théâtre abstrait » de métamorphoses où formes, couleurs, sonorités, mouvements et temps jouent les acteurs, annonce d'autres bouleversements. Je pense aux systèmes chaotiques du compositeur John Cage (*Imaginary Landscape Number Four*, 1951) et du chorégraphe Merce Cunningham (*RainForest*, 1968, *Roaratorio*, 1983 juste avant la conception de son outil de travail : le logiciel *Life Forms* en 1989), qui partent de règles simples pour créer des systèmes dynamiques complexes et mènent à une vision nouvelle des espaces scéniques. Ils se sont inspirés de la Théorie générale de la Relativité, dans laquelle chaque point ne se réfère qu'à lui-même ou aux points qui lui sont très proches. Les sons, les mots, les mouvements, les couleurs, les lumières interagissent parfois aléatoirement entre eux et avec l'environnement scénique ; ils laissent ainsi apparaître de nouvelles entités autonomes, explorant des territoires vierges d'où émergent des comportements imprévisibles, autonomes, inédits. Les chorégraphies de Merce Cunningham évacuent toute idée d'espace hiérarchisé ou centralisé au profit de flux distribués, d'espaces scéniques traités en réseaux d'énergies, de scènes telles des champs continus où le regard ne peut s'accrocher (Lestocart, 2005). L'espace n'y est plus vide ni homogène. La chorégraphie-happening s'étale en mouvements de vagues sur la scène, rejoignant l'idée de « *all over* » propres aux peintures-performances du peintre américain Jackson Pollock, célèbre pour sa technique de dripping.

Construire le monde au moyen d'architectures d'informations dynamiques plutôt que représenter uniquement ses apparences, est une idée qui contient déjà une sorte de pensée technologique et, comme nous l'avons vu, ce projet n'a pas attendu les technologies électroniques ou digitales pour exister. Cependant, il est temps d'aborder maintenant comment les technosciences et les modèles informatiques qui les rendent applicables fournissent à l'artiste les moyens d'inventer de nouvelles écritures corrélées à l'évolution de nos connaissances sur l'univers, la place que l'homme y occupe, la matière, l'énergie et les formes.

2. Description du projet *Émergillience*

2.1. Une recherche en cours de développement

Lorsque j'ai commencé à utiliser un ordinateur, puis quand j'ai découvert avec des chercheurs en informatique certaines possibilités de la programmation algorithmique, ma pratique de plasticienne a évolué. Dans le cadre de *La Villa Media*, en tant qu'artiste invitée, je me suis intéressée aux systèmes complexes et à leur modélisation ainsi qu'aux phénomènes d'émergence et d'auto-organisation que l'on peut observer dans la nature. Ces phénomènes créent des formes et des structures que certains scientifiques ont constitué en « modèles » au sens informatique du terme afin d'en décrire le fonctionnement, les propriétés et les évolutions, prédictibles ou non. L'enjeu m'est alors devenu limpide et impérieux : créer des formes, non plus en transcrivant ou en enregistrant le résultat de l'aspect extérieur de figures observables dans la nature ou d'une manière plus générale dans la réalité visible de notre environnement, mais en m'intéressant aux processus qui les engendrent. La programmation computationnelle d'entités dotées de comportements autonomes

m'est alors apparue comme l'outil idéal pour réaliser mon objectif : renouveler la notion de « champ pictural » pour tenter de m'exprimer en adéquation avec les avancées actuelles de nos connaissances dans différents domaines, comme par exemple la physique quantique. J'ai trouvé un intérêt plastique et artistique à la sensation d'auto-organisation et à la perception visuelle que peut en avoir un observateur. Car j'ai pu expérimenter la mise en œuvre de phénomènes naturels (l'organisation des fourmis par exemple, j'y reviendrai), la visualisation de modèles informatiques connus, à base d'agents, leur variation ou l'invention de nouveaux modèles. La simulation de ces modèles permet de décrire l'évolution d'un système au cours du temps et par là même de traduire quelque chose que nous expérimentons dans notre réalité quotidienne : l'importance de nos interactions avec les autres, de notre connexion à l'environnement, aux événements dans une transformation incessante d'états plus ou moins stables et de niveaux d'organisation plus ou moins compliqués. Pour figurer ces phénomènes, le recours à des processus de modélisation rend perceptible la notion de forme (*Gestalt*) comme un ensemble de relations dynamiques interdépendantes. « La relation comme forme » dit Jean-Louis Boissier (Boissier, 2004).

Il ne s'agit donc plus, comme je le faisais par le dessin ou la peinture, de rendre compte du monde par les traces visibles laissées par des outils sur un support, mais d'explorer une palette de règles de comportements individuels et locaux conduisant à l'émergence de phénomènes collectifs et globaux. Le projet *Emergilience* (dont le titre est composé du début et de la fin de deux termes utilisés dans la description de certains systèmes : émergence et résilience) se propose d'une part d'explorer les conditions pour l'émergence de formes artistiquement intéressantes générées par des phénomènes d'auto-organisation, et d'autre part de créer des perturbations dans l'équilibre obtenu tel qu'il est donné à percevoir visuellement par un observateur. Ceci afin de travailler sur des processus « génératifs » d'évolution permettant de donner à voir les capacités d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser et à retrouver son équilibre antérieur. Il s'agit ensuite de concevoir et de trouver des modes de rendus (*data visualization*) de ces processus qui soient visuellement intéressants, riches, variés et porteurs de sens pour un public observateur.

2.2. Ce qui a déjà été réalisé²

2.2.1. Recherche de modèles d'émergence connus

Sur le plan méthodologique, j'ai initié ce projet en explorant une série de modèles de simulation connus (biologiques, chimiques, géologiques ou sociaux), fondés sur des dynamiques d'émergence variées ainsi qu'en maniant des jeux de paramètres de ces modèles et leur déclinaison en variantes. Cette exploration s'est faite empiriquement grâce à un outil de modélisation et de simulation, utilisé comme outil « d'esquisse ». Il ne s'agit pas, en effet, de conduire ici une validation scientifique des mécanismes et conditions d'émergence dans les modèles implémentés, mais plutôt de rechercher des potentiels esthétiques et de s'intéresser à la sensation perceptive claire d'émergence de structures formelles par des procédés d'auto-organisation que ces modèles peuvent permettre de constater pour un observateur.

Cette phase prospective a été réalisée à l'aide de la plateforme GAMA³ (Fig. 4) dans sa version 1.6.1, un outil de modélisation et de simulation à base d'agents qui permet l'implémentation ou

² De nombreuses informations contenues dans ce paragraphe sont issues du mémoire de stage de master 2 IC² A - Art, Science et Technologie (INP Phelma, École Nationale Supérieure de physique, Électronique, Matériaux, Grenoble) de (Bobo 2016). Stage que j'ai encadré en tant que tuteur et dont la soutenance a eu lieu le 23 juin 2016 à Grenoble.

³ GAMA est une plateforme de développement pour la modélisation et la simulation de systèmes à base d'agents. Cet environnement est développé depuis 2010 par différentes équipes de recherche en France et au Vietnam. Voir : <http://gama-platform.org/>

l'interprétation de modèles connus. L'objectif étant de se constituer une sorte de « palette » de modèles d'émergence loin d'être exhaustive mais qui représente le champ des possibles en la matière.

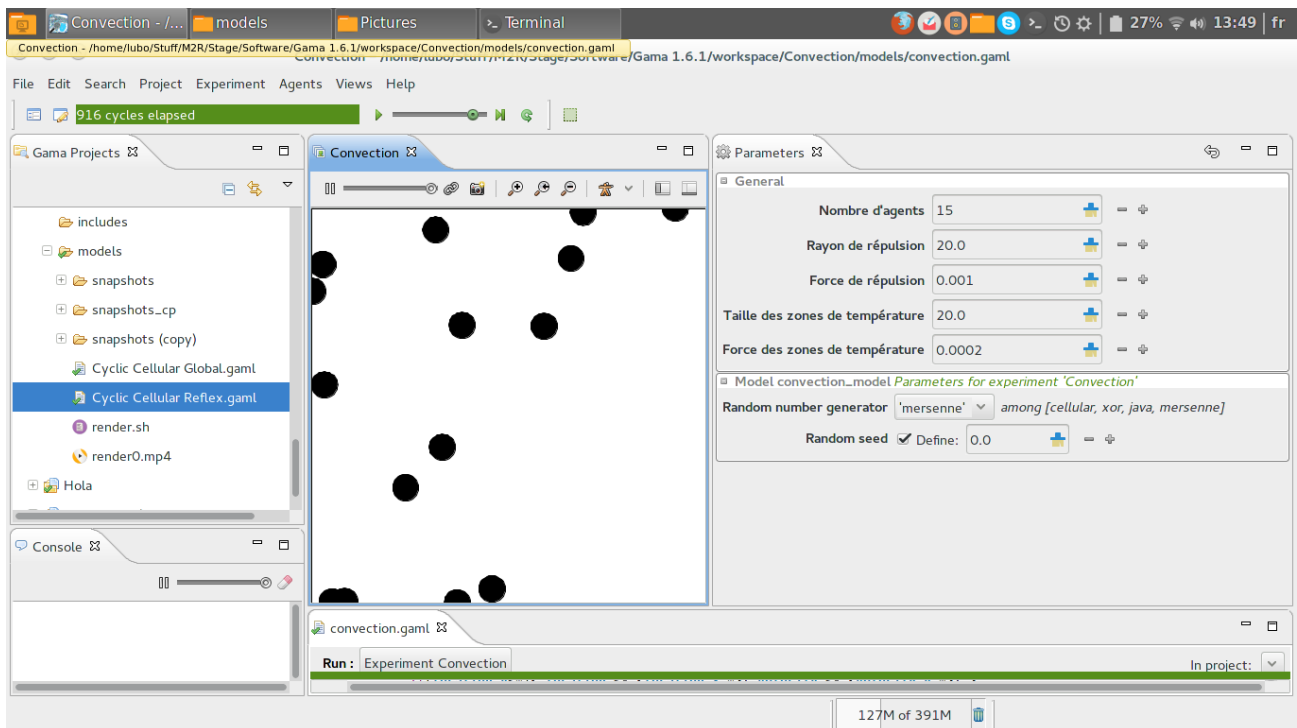


Fig. 4. Interface du logiciel GAMA (version 1.6.1) Perspective de simulation. Capture d'écran.

Avant de passer à l'étude de ces modèles existants, réunissant différents phénomènes d'émergence, connus ou originaux, je souhaite tenter de cerner deux notions essentielles dans la compréhension des systèmes complexes : l'émergence et l'auto-organisation. Dans sa thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, l'informaticien Guillaume Hutzler (Hutzler, 2011, p. 54) nous rappelle que : « L'auto-organisation et l'émergence sont couramment invoquées comme les principaux processus de structuration des systèmes complexes, même s'ils sont tous deux délicats à définir, tant les définitions proposées sont multiples, souvent complémentaires mais potentiellement contradictoires. L'auto-organisation est souvent décrite comme une augmentation de l'ordre, mesurée par exemple par une diminution de l'entropie du système, sans que le processus de structuration soit guidé par un contrôle externe. » Il poursuit : « Nous nous appuyons pour notre part sur la définition générale donnée par De Wolf et Holvoet (2004), qui dit que "l'auto-organisation est un processus dynamique et adaptatif par lequel des systèmes acquièrent et maintiennent une structure par eux-mêmes, sans contrôle externe". » Pour l'économiste Jeffrey Goldstein (Goldstein, 1999) le processus d'auto-organisation porte également l'idée d'un changement d'état : un système désorganisé devient organisé et ce, sans intervention extérieure ni maîtrise globale du système. Cette absence de maîtrise globale correspond à une absence de planification, mais également à une organisation résultant d'interactions locales. En ce qui concerne une définition de l'émergence, citons à nouveau Hutzler (2011, p. 55) qui fait référence à Aristote et sa *Métaphysique* : « L'émergence pour sa part est souvent caractérisée, en paraphrasant abusivement Aristote⁴, par le fait que le tout est plus que la somme des parties. L'idée exprimée est que les entités locales produisent un comportement global qui ne peut être déduit de l'étude des entités locales, ou

⁴ « En effet, pour toutes les choses composées de plusieurs parties, et où le Tout qu'elles forment n'est pas simplement un amas, mais où il y a un total qui est quelque chose indépendamment des parties, il faut bien qu'il y ait une cause à l'unité qu'elles présentent. » Aristote, *Métaphysique* 8.6 1045a7-10, traduction de J. Bathélemy-Saint-Hilaire.

bien que le tout acquiert des propriétés qui ne sont pas présentes de manière intrinsèque dans les parties. La notion d'émergence fait depuis longtemps l'objet d'un débat passionné sans qu'un consensus puisse réellement émerger (Bonabeau et al., 1995, Deguet et al., 2006), et il ne s'agit pas ici de proposer ma propre définition de l'émergence. Je m'en tiendrai à nouveau à la définition de De Wolf et Holvoet (2004) : « un système exhibe de l'émergence lorsque des émergents cohérents apparaissent dynamiquement au niveau macro à partir des interactions entre les parties au niveau micro. De tels émergents ont un caractère de nouveauté par rapport aux parties individuelles du système. » Ainsi, pour résumer (Lavaud-Forest 2012, p. 338-339), « on parlera de propriétés émergentes lorsqu'un système, pris dans son ensemble (on parlera de niveau global ou macro), manifeste des comportements qui ne sont pas présents explicitement dans chacun des composants du système (niveau local ou micro), mais qui sont le résultat de la dynamique interne des interactions au sein du système et/ou de ses interactions avec son environnement. » Guillaume Hutzler (Hutzler 2000, p. 37) ajoute la présence d'un processus de rétroaction dans la manifestation de certains comportements émergents : « Les comportements et interactions individuels déterminent l'émergence de structures globales qui, en retour, contraignent l'activité individuelle [Ferber, 1995]. » L'exemple donné qui illustre ce phénomène, est celui des fourmis qui explorent leur environnement à la recherche de nourriture et qui la rapportent à la fourmilière, en s'organisant en files (niveau global). Qui, en effet, n'a pas eu l'occasion d'observer sur un chemin de campagne une colonie de fourmis dessinant au sol une ligne noire constituée de ces insectes super « auto-organisés » cheminant les uns derrière les autres ? Cette observation est particulièrement intéressante pour un artiste visuel : la ligne n'est-elle pas un des moyens ancestraux et privilégiés dont il dispose pour dessiner ? Ce qui est donc fascinant pour lui, c'est cette méthode originale pour créer une ligne par le processus sous-jacent permettant de matérialiser le tracé de cette ligne : chaque individu (niveau local) suit une règle simple. Chaque fourmi suit les traces chimiques (phéromones) déposées auparavant par une autre fourmi retournant à la fourmilière avec de la nourriture. « Répliqué sur un grand nombre de fourmis, ce simple comportement de suivi de traces suffit à faire émerger ce qu'un observateur identifie comme un comportement global de constitution de files [Hölldobler et Wilson, 1990]. » (Hutzler 2000, p. 37). En retour, la modification des traces chimiques de phéromones laissées sur le sol (par évaporation dans le temps, par exemple) peut impacter le comportement individuel de la fourmi. Aucune fourmi n'a conscience de ce qu'est une file, et chacune se contente de suivre les traces chimiques laissées sur le sol par les autres fourmis à leur retour au nid. C'est ainsi que le système s'organise par lui-même sans contrôle centralisé venu de l'extérieur mais se régule de l'intérieur de manière distribuée. Ce modèle naturel de comportements collectifs a inspiré de nombreux projets scientifiques de modélisation, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée dont relèvent les Systèmes-Multi-Agents⁵ et qui sont regroupés dans le domaine de l'intelligence en essaim (ou *swarm intelligence*).

Jeffrey Goldstein (Goldstein, 1999) définit, lui, l'émergence de façon beaucoup plus simple comme « l'apparition de structures, motifs et propriétés nouvelles et cohérentes durant le processus d'auto-organisation dans des systèmes complexes »⁶. La notion de système complexe est elle-même utilisée pour désigner des systèmes composés d'entités plus simples que le système lui-même, c'est-à-dire des entités qui font émerger des propriétés nouvelles à travers leurs interactions. Une somme d'éléments en interaction montrant chacun un certain comportement individuel, peut donc faire émerger un comportement de groupe qui n'est pas inscrit explicitement dans le comportement de chaque élément. Cependant, selon les cas, et selon la connaissance que l'on a d'un système

⁵ Voir par exemple le projet MANTA (*Modelling a ANThest Activity*) dans Drogoul (1993, p. 55-114).

⁶ « Emergence [...] refers to the arising of novel and coherent structures, patterns, and properties during the process of self-organization in complex systems. » (Goldstein, 1999, p. 49)

particulier, il peut être possible de déduire ce que sera le comportement d'un groupe constitué d'éléments ayant certaines propriétés individuelles. Dans d'autres cas, le comportement de groupe peut s'avérer surprenant, inattendu (Bobo, 2016).

Cependant il est à noter qu'émergence et auto-organisation ne sont pas des phénomènes obligatoirement indissociables. Dans certains cas, un processus d'auto-organisation n'est pas perceptible. C'est-à-dire qu'il ne conduit pas forcément à l'émergence de structures, motifs ou propriétés nouvelles et cohérentes qu'il serait possible d'observer. Guillaume Hutzler (Hutzler, 2011, p. 54-55) rappelle que les notions d'émergence et d'auto-organisation ne sont pas synonymes. « On peut d'ailleurs trouver des systèmes avec des propriétés émergentes mais sans auto-organisation et vice versa. La pression d'un gaz est typiquement une propriété émergente liée aux interactions entre les particules qui composent le gaz mais sans qu'il y ait auto-organisation. Réciproquement, un système à base d'agents peut s'organiser de manière autonome de par les interactions entre les agents, sans nécessairement émergence de nouvelles propriétés globales. »

Pour ma part, ce que j'ai recherché dans les différents modèles sélectionnés comme base de départ à nos expérimentations, c'est une certaine expressivité de la forme émergente, afin qu'elle puisse être clairement perçue et appréciée esthétiquement. Il s'agit aussi de privilégier une prédictibilité limitée de la forme émergente issue d'un processus d'auto-organisation progressif à partir de règles de comportements locaux simples, afin de permettre à l'observateur de découvrir l'apparition de cette forme dans la durée.

Un exemple de modélisation réalisée sur la plateforme GAMA (en partant de la plus simple pour aller vers des formes plus complexes et dont le résultat n'est pas forcément attendu) est celui de l'émergence d'une forme reconnaissable : le cercle. Au temps $t = 0$, des particules sont placées de façon aléatoire ; au cours de la simulation, au temps $t = 50$, elles créent dans un rendu dynamique 2D, une figure qui est lue comme circulaire par l'œil humain (voir Fig. 5).

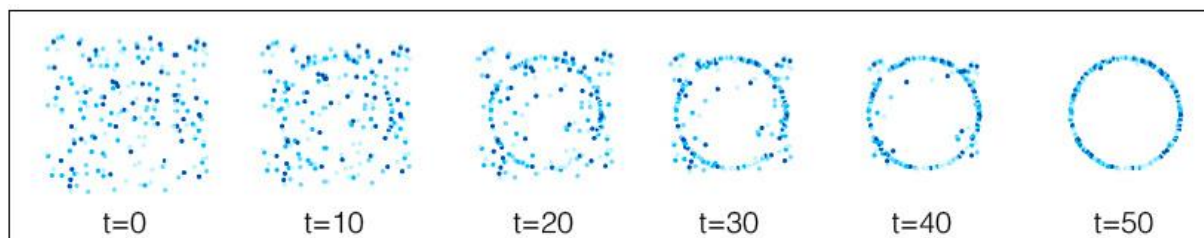


Fig. 5.⁷ Les agents placés initialement de façon aléatoire ($t=0$) créent une forme circulaire au cours de la simulation ($t=50$).

Pour en venir à la « palette » de modèles informatiques étudiés en amont de la recherche pour le projet *Emergilience*, j'en citerai cinq parmi ceux sélectionnés : les *automates cellulaires cycliques*, la *formation de stries* dans une forêt de conifères et dans la brousse tigrée, les *modèles d'écoulement*, la *synchronisation d'agents orientés* et le modèle d'interactions *Proies-Prédateurs*.

Les *automates cellulaires* sont des systèmes à base d'agents répartis en grille dans un espace, dont les états sont généralement discrets et mis à jour de manière synchrone. Les *automates cellulaires cycliques* sont étudiés, notamment, en tant que modèles de réaction chimique, comme par exemple la réaction de Belousov-Zhabotinsky (Gerhardt, Schuster 1989). On leur reconnaît l'émergence de cercles concentriques et de spirales qui se propagent dans l'espace du système. A l'instar de ce qui se passe dans les chorégraphies de Merce Cunningham évoquées précédemment, où chaque point de

⁷ Figure empruntée à (Grignard, 2015, p. 23).

l'espace ne se réfère qu'à lui-même ou à ceux qui l'entourent, les agents sont répartis sur une grille et réagissent aux états dans lesquels sont leurs voisins. Chaque agent peut prendre un état parmi trois : A, B ou C. Un agent peut passer à l'état suivant ($A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$ ou $C \rightarrow A$) si au moins trois agents qui l'entourent sont dans cet état. Tous les agents évoluent de manière synchrone. Au début de l'exécution du modèle, chaque agent prend un état aléatoire parmi les trois états possibles. Au bout d'un certain nombre d'itérations⁸, la forme dominante émergente est celle de la spirale, qui naît et s'entretient à l'interface entre trois zones d'agents aux états respectifs A, B et C (voir FIG. 6).

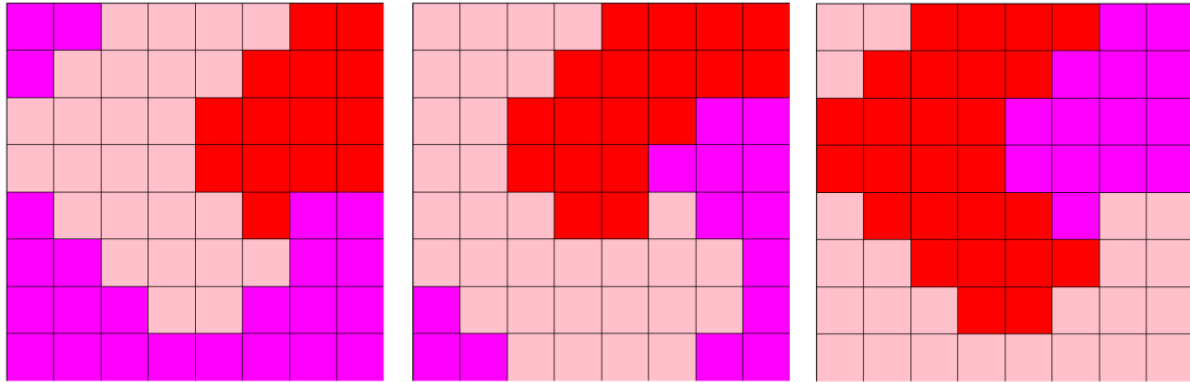


Fig. 6. Émergence d'une spirale au sein d'un groupe de 64 agents
Trois instantanés pris à quelques itérations d'intervalle

Des variantes de ce modèle sont possibles en changeant le nombre d'états ou le seuil de passage à l'état suivant. Deux variantes sont ici proposées, qui font émerger un « clignotement » du système, c'est-à-dire que tous les agents – ou presque – changent d'état à chaque itération, de manière cyclique (voir Fig. 7).

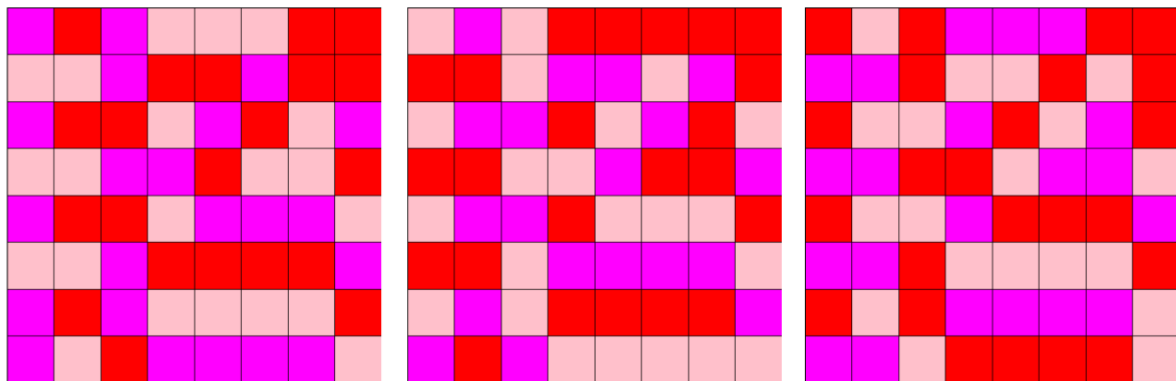


Fig. 7. Émergence de clignotements à trois états. Instantanés des trois situations qui se succèdent en boucle, une fois la phase périodique du système atteinte – ici, au bout d'une dizaine d'itérations – à partir de conditions initiales aléatoires.

Dans le modèle naturel de *formation de stries*, observée dans des forêts de conifères ou en Afrique au sein de la brousse tigrée, ces phénomènes sont dus à des facteurs différents, mais le processus y est similaire : la survie de l'arbre ou de l'arbuste dépend de la présence ou non de ses pairs devant lui. Le modèle de simulation vise à faire émerger des motifs répétitifs de bandes

⁸ Temps nécessaire d'exécution minimum pour observer un changement qualitatif.

régulières, ou stries, suivant ce type de processus de croissance de la végétation (voir Fig. 8 et 8 bis).



Fig. 8. *Vue aérienne de brousse tigrée en Afrique*

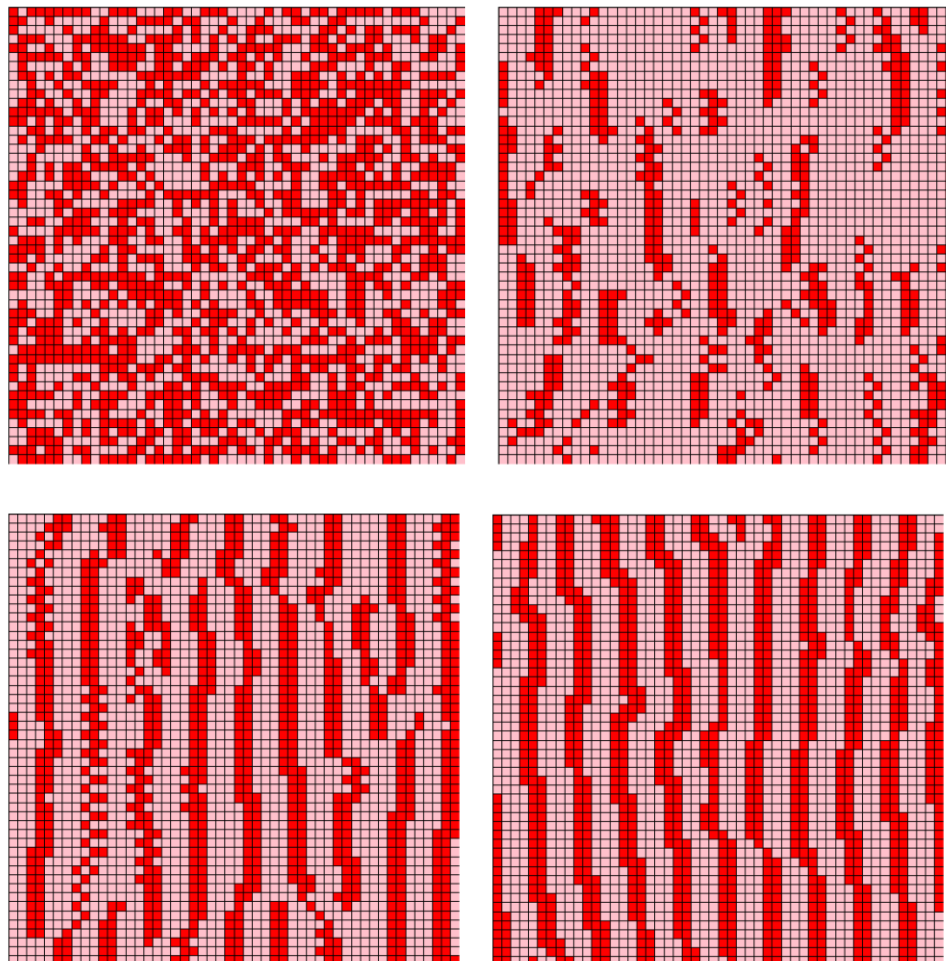


Fig. 8 bis. *Émergence de bandes irrégulières dans un groupe de 2500 agents orientés vers la gauche. En haut à gauche, conditions initiales aléatoires ; en haut à droite et en bas à gauche, deux instantanés pris dans la phase transitoire du système ; en bas à droite, instantané de la phase permanente du système (défilement des bandes irrégulières vers la gauche).*

En ce qui concerne le *modèle d'écoulement*, il est inspiré de l'environnement naturel par la formation de méandres et autres formations géologiques liées à l'écoulement de l'eau dans un milieu

sédimentaire. Le modèle de simulation met en œuvre les interactions entre différents agents : les trajectoires de l'eau, les sédiments, les marquages (accidents qui perturbent les trajectoires) et l'espace dans lequel évoluent les agents. Une variante de ce modèle intègre également une notion de force des marquages au sol, avec les règles suivantes :

- La force des marquages est un facteur dans l'influence qu'ils ont sur la direction des agents.
- Un marquage est renforcé à chaque instant où il est survolé par un agent.
- La force des marquages s'atténue au cours du temps.

Les formes émergentes sont des trajectoires larges, rectilignes ou courbes jusqu'à se refermer en cercles. Le modèle de *synchronisation d'agents orientés* mène à l'émergence d'une dynamique de groupe d'agents répartis aléatoirement dans un espace en grille et qui, conditionnés par un jeu de règles données, finissent par tous pivoter ensemble dans le même sens de manière synchrone. Je terminerai ce rapide aperçu des différents modèles étudiés en amont de la recherche pour le projet *Emergilience* par le modèle d'*interaction Proies-Prédateurs*. C'est ce modèle qui a finalement été retenu pour servir la réalisation d'animations 2D que je nomme des « tableaux-systèmes dynamiques infinis » dont je parlerai plus en détail dans la suite de cet article. Ce modèle est intéressant par rapport aux objectifs fixés car il réunit les caractéristiques suivantes :

- sensation d'auto-organisation perceptible
- dynamique d'émergence progressive
- diversité des émergences selon la variation de certains paramètres
- expressivité de la forme émergente
- non prédictibilité de la forme émergente au niveau global par rapport aux comportements individuels locaux
- atteinte d'une phase stable du système
- possibilité de différents types de visualisations du même modèle

2.2.2. Choix d'une programmation algorithmique : les SMA

Pour le développement de ce travail, il a été choisi d'utiliser une conception de programmation informatique à base d'agents. On trouve l'utilisation des Systèmes Multi-Agents (SMA) dans différents domaines : cartographie, robotique, régulation du trafic aérien, routier... Les agents sont le résultat logique d'une approche unifiant plusieurs courants de recherche et de développement préexistants et très actifs. Historiquement (Briot, Demazeau, 2001), on peut replacer les concepts d'agent et de Système Multi-Agents dans l'histoire de l'intelligence artificielle et, de manière duale, dans l'histoire de la programmation. On utilise également le terme quasiment équivalent d'intelligence artificielle distribuée (avec son acronyme IAD) pour bien montrer l'opposition à l'IA classique, autarcique et centralisée que sont les systèmes experts. Rompant avec le modèle de l'aptitude intelligente d'une entité unique (l'expert) pour résoudre un problème, les SMA mettent en jeu des agents autonomes produisant une sorte d'« intelligence collective » distribuée entre les différents agents grâce à leurs capacités de coordination, coopération, organisation, perception, communication et action pour arriver à une solution au problème posé. Les SMA sont à l'intersection de plusieurs domaines scientifiques : informatique répartie et génie logiciel, intelligence artificielle, vie artificielle. Ils s'inspirent également d'études issues d'autres disciplines connexes, notamment la sociologie, la psychologie sociale, les sciences cognitives et bien d'autres. Guillaume Hutzler (Hutzler, 2011, p. 10), qui a lui-même utilisé l'architecture de simulation multi-

agents pour des projets en étroite collaboration avec des artistes, affirme : « Par les possibilités qu'ils offrent pour créer, manipuler, simuler toutes sortes de systèmes complexes, naturels et sociaux, les systèmes multi-agents constituent un outil puissant et souple pour faire le lien entre art et science, à la fois outil de simulation scientifique et outil de création artistique. » La raison de cette polyvalence réside sans doute dans le fait que le concept de système multi-agents propose un cadre de réponse à ces deux enjeux complémentaires (et à première vue contradictoires) : l'autonomie et l'organisation. Grâce à la notion d'autonomie de l'agent pour résoudre les tâches qui lui sont demandées, on sort du cadre procédural classique, ce qui permet à l'agent de faire face à des situations non nécessairement prévues à l'avance par le concepteur (Lavaud-Forest, 2012), une conjoncture bien connue dans le processus de création artistique.

Bien que, comme nous l'avons vu, la modélisation à base d'agents se différencie d'une approche verticale et hiérarchisée des instructions, elle s'implémente assez bien sur tout langage de programmation orientée-objet. Cependant, des outils logiciels dédiés existent, permettant de modéliser dans un langage plus expressif, et comportant des fonctions de visualisation et de réglage de paramètres adaptées. Plusieurs outils existent⁹, et nous avons choisi de travailler, nous l'avons vu, sur le logiciel GAMA, en version 1.6.1 au moment de ce travail. Cet outil, conçu à l'origine principalement pour des simulations de systèmes réels – villes, formations géologiques, etc. –, continue d'être développé, notamment en ce qui concerne ses modalités de visualisation (Grignard, 2015). Il ne dispose pas encore de fonction d'export de rendus vidéos, mais il a été possible de combler ce manque en utilisant la fonction d'export automatique d'instantanés au cours de la simulation. L'outil est également multiplateforme, facilitant le co-working à distance sur des systèmes d'exploitation différents. La programmation des modèles se fait en GAML, langage dédié à la modélisation à base d'agents. L'architecture de modélisation intègre notamment une séparation claire des descriptions comportementales des agents et de leurs représentations. Il est donc possible, comme nous le verrons, de générer des représentations différentes du même modèle lors d'une simulation unique.

2.2.3. Les animations génératives

Les premières réalisations pratiques des « Tableaux-systèmes dynamiques infinis » du projet *Emergilience* ont mené à la création de séries d'animations numériques sous forme de programmes exécutables. Micro-univers en perpétuelle évolution, ces œuvres génératives, une fois le programme lancé, vivent leur propre vie sous l'action des règles de génération en fonction des conditions initiales¹⁰ (environnement, nombre d'éléments-agents, comportements, états, vitesse, énergie, etc.) définies à l'initialisation du programme informatique. L'idée d'un art de métamorphose contenue dans celle de « scène abstraite » des avant-gardes du début du XX^{ème} siècle, trouve là sa transposition virtuelle dans laquelle la dynamique est, non pas pré-calculée par la machine, mais simultanée au lancement du programme qui s'exécute sous les yeux du regardeur.

La transposition des modèles simulés dans GAMA s'est faite avec le langage Processing¹¹. Celui-ci étant basé sur Java, on retrouve l'avantage d'un langage orienté-objet, avec une bonne adéquation à la modélisation à base d'agents et la facilité de rendre le programme accessible pour différentes

⁹ NetLogo, GAMA, Repast ou Mason, pour n'en citer que quelques-uns.

¹⁰ Les conditions initiales du système correspondent à l'état dans lequel les agents se trouvent au début d'une exécution du modèle (sa simulation). Ces conditions peuvent éventuellement concerner l'environnement s'il est composé d'éléments variables. L'émergence du (ou des) phénomène(s) peut être très dépendante de ces conditions, ou au contraire être robuste face à de grandes variations.

¹¹ <https://processing.org/>

plateformes et systèmes d'exploitation. En outre, Processing rend aisé le travail graphique des représentations des modèles, du moins dans le cadre de ses capacités (c'est-à-dire qu'à partir d'un certain nombre d'agents, des limites claires se font sentir dans le temps d'exécution). Il est également envisageable de porter l'animation sur le web avec le compilateur Processing pour JavaScript (processing.js).

Le choix du modèle à développer s'est porté, nous l'avons dit, sur le modèle d'interactions *Proies-Prédateurs*, qui offre une sensation visuelle d'auto-organisation particulièrement claire. De plus, il est possible, avec des changements sur les paramètres du modèle, d'obtenir des dynamiques d'émergences assez variées : une phase de stabilisation progressive s'opère dans la durée et l'on découvre peu à peu l'état dans lequel le système s'installe en acquérant de nouvelles propriétés.

Dans ce modèle les éléments-agents sont mobiles et se déplacent dans un espace plan borné. Chaque élément-agent est le prédateur d'un autre agent et par conséquent, ce second élément-agent est alors la proie de son prédateur. Chaque élément-agent a une proie unique et un prédateur unique. Les règles comportementales sont simples : chaque prédateur cherche à se rapprocher de sa proie et chaque proie cherche à s'éloigner de son prédateur. En outre, les agents cherchent à éviter le contact avec les bords de l'espace, et leur vitesse de déplacement est limitée. Selon le nombre d'agents et leurs positions initiales, des formes telles qu'un mouvement de groupe circulaire, ou un alignement des agents sur une trajectoire commune peuvent émerger. Dans cette première série d'animations réalisées, l'attention s'est portée sur la mise en œuvre de différentes visualisations de ce même modèle d'interaction *Proies-Prédateurs*. Une première possibilité de représentation graphique du modèle est de choisir comme état variable des agents leur position (qui se traduit donc en termes de déplacement) dans un espace à deux dimensions : le plan de l'écran. Cet espace de position dans le plan n'est en fait qu'une des projections possibles de l'espace bidimensionnel des états variables des agents. Chaque agent peut voir son état varier selon deux degrés de liberté, qui peuvent aussi bien être considérés comme une abscisse et une ordonnée que comme d'autres grandeurs visuelles. Ces grandeurs, à défaut d'être liées à la position des agents dans l'espace, peuvent être liées à leur couleur, leur forme, leur taille, ou tout autre aspect perceptible visuellement comme leur vitesse etc. La diversité des représentations possibles du système est donc très riche, et fera apparaître la dynamique du système de différentes manières aux yeux de l'observateur. Certaines seront préférables pour mettre en avant une périodicité dans le système, d'autres pour la manière dont elles font apparaître une symétrie, etc.

De plus, chaque élément-agent peut s'habiller d'un rendu graphique riche et varié : d'un simple point lumineux à des formes aux couleurs, tailles et matériaux divers : petit, flou, net, clignotant, rigide, élastique, géométrique, déformé etc.

La Fig. 9 montre la représentation du modèle *Proies-Prédateurs* dans GAMA avec cinq agents. Les paramètres variables sont la position de chaque agent dans l'espace à deux dimensions (abscisse, ordonnée).

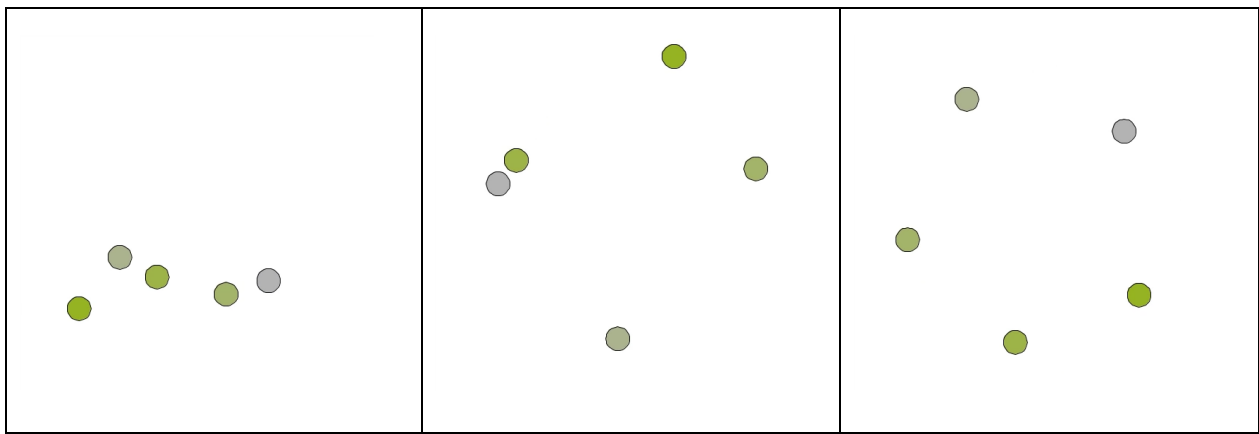


Fig. 9. Représentation du modèle Proies-Prédateurs dans GAMA

À gauche : les conditions initiales, puis deux instantanés pris dans la phase périodique stable du système.
Une rotation circulaire émerge dans le mouvement du groupe.

La Fig. 10 reprend la même visualisation du modèle *Proies-Prédateurs* dans GAMA avec 8 agents. La Fig. 10 bis reprend le même modèle, travaillé cette fois sous Processing. Les agents sont de couleur violette sur un fond sombre et laissent derrière eux une traînée lumineuse, mémoire de leur mobilité. Là encore, trois états du système ont été capturés : à gauche, une répartition aléatoire des éléments-agents, au centre un état intermédiaire laissant percevoir un début d'organisation et à droite, un début de stabilisation du système dans un état où les éléments-agents se regroupent par paires et tournent tous dans le même sens selon une trajectoire circulaire.

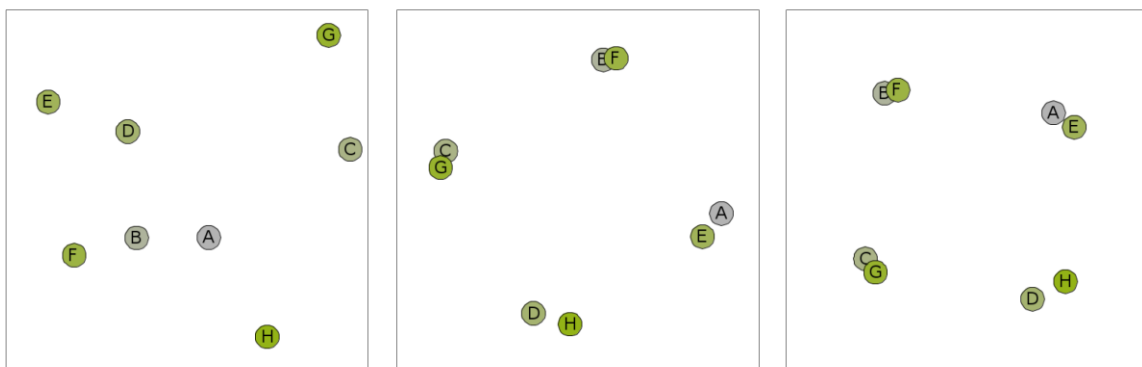


Fig. 10. Représentation du modèle Proies-Prédateurs dans GAMA. Émergence de paires dans un groupe de huit agents : à gauche, la répartition initiale aléatoire ; au centre et à droite, deux instantanés pris à l'approche de la phase stable du système.

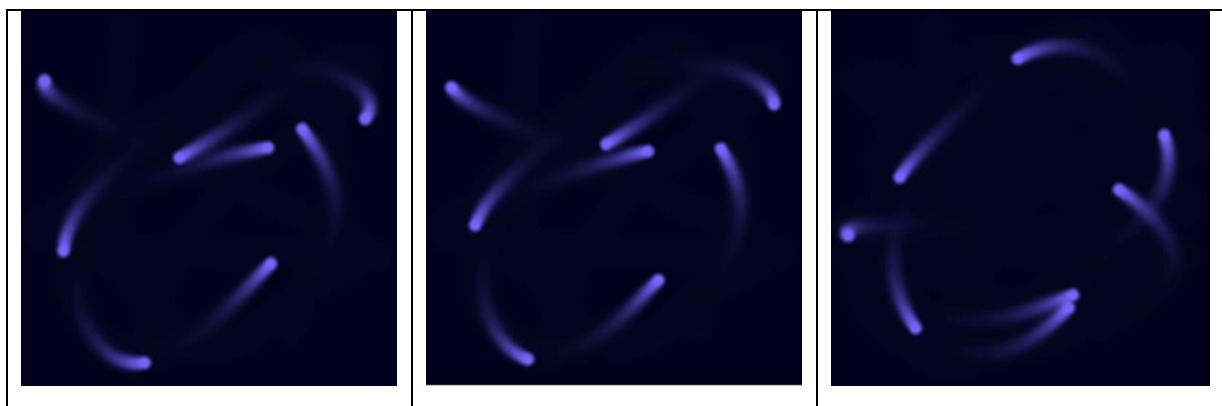


Fig. 10 bis. Même représentation du modèle Proies-Prédateurs que la Fig. 10, mais travaillée sous Processing.

Dans la Fig. 11, les états des variables des agents sont ici incarnés dans des dimensions graphiques et non plus spatiales. Chaque agent, au lieu d'évoluer dans un espace de positions, évolue dans un espace de couleurs dont la saturation et la brillance sont les dimensions variables. Un premier essai a été réalisé dans GAMA. Le système est composé de cinq agents représentés en cinq sections de même couleur. Le ton bleu (teinte de 200° dans le système HSB¹²) est fixe et la saturation et la brillance sont variables. Chaque agent essaie de rapprocher les paramètres de sa couleur de celle de sa proie (section suivante dans le sens antihoraire) et de les différencier de celle de son prédateur (section précédente dans le sens antihoraire). Un déroulement cyclique des couleurs émerge alors dans cette représentation : une rotation des couleurs s'observe dans le sens horaire.

À titre de comparaison, les états des agents dans les instantanés de la Fig. 11 sont les mêmes, respectivement, que les états des agents dans les instantanés de la Fig. 9.



Fig. 11. Représentation du modèle Proies-Prédateurs dans un espace de couleurs avec un groupe de cinq agents : à gauche, les conditions initiales ; puis deux instantanés pris dans la phase périodique stable du système

Dans la Fig. 12, le principe est le même que dans la Fig. 11, c'est-à-dire que les comportements de fuite des proies et d'approche des prédateurs sont traduits graphiquement par la modification de la brillance et de la saturation de la couleur mais avec une interpolation des couleurs entre les agents, créant ainsi un certain continuum dans le système composé de quelques agents. De plus, les agents sont disposés en sections découpées dans un disque et non dans un carré comme ils le sont dans la Fig. 11. Lorsque les agents s'organisent en plusieurs tours, dans ces conditions avec des groupes de six ou huit agents notamment, des effets de symétrie apparaissent clairement sur ce type de représentation. Cette sensation de symétrie est renforcée dans les instants où des pics de couleurs sont marqués (phase de stabilisation, à droite dans la Fig. 12). Il s'agit, dans ce cas, de donner à voir un phénomène d'émergence, à la fois en jouant sur la sensation d'auto-organisation et sur les qualités esthétiques des dynamiques transitoires.

¹² Le modèle TSV pour Teinte Saturation Valeur (en anglais HSV pour Hue Saturation Value ou HSB pour Hue Saturation Brightness que l'on peut traduire en français par Teinte, Saturation, Brillance –terme que j'utiliserai - ou Luminosité ou parfois Luminance), est un système de gestion des couleurs en informatique.

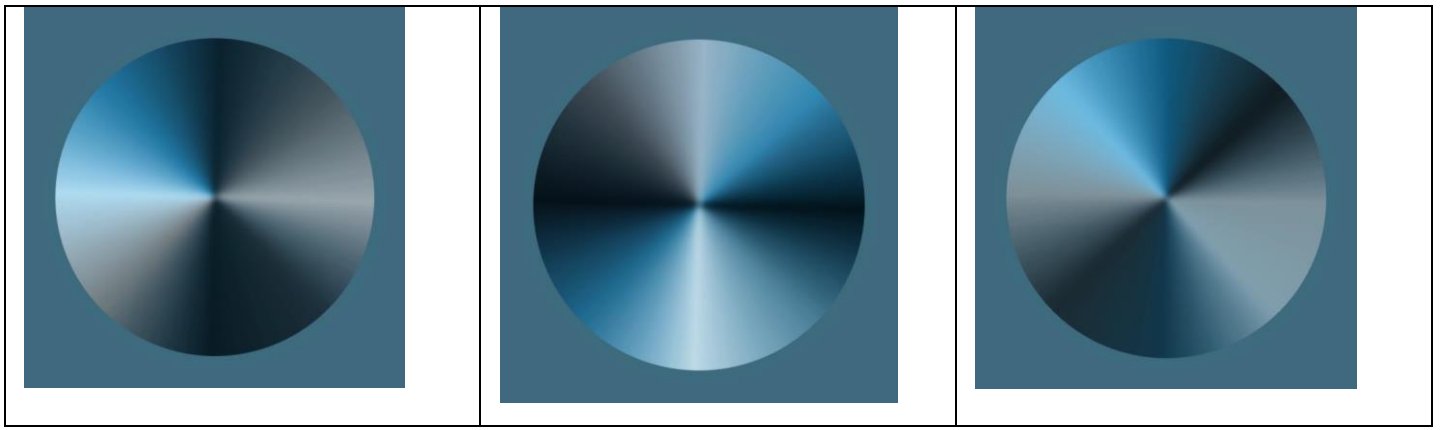


Fig. 12. Représentation du modèle Proies-Prédateurs dans un espace de couleurs avec un groupe de huit agents en couleurs interpolées : à gauche, les conditions initiales, puis deux instantanés pris dans la phase périodique stable du système.

Une autre possibilité de visualisation, toujours du même modèle, a été réalisée en jouant sur la taille des éléments-agents qui sont figurés par des sections d'un disque (comme sur la Fig. 12) mais un disque percé. Les relations Proies-Prédateurs sont établies comme dans les Fig. 11 et 12 entre deux agents voisins contigus. Les deux variables de l'aspect visuel des agents sont l'ouverture d'angle et l'épaisseur de la section du disque (voir Fig. 13).



Fig. 13. Représentation du modèle Proies-Prédateurs avec cinq agents en sections sur un disque percé. Deux instantanés du système.

La Fig. 14 présente un essai de superposition dans la même animation de deux représentations graphiques différentes du même modèle, telles que nous les avons vues Fig. 9 et 11 : visualisation du modèle Proies-Prédateurs avec cinq agents se déplaçant dans un espace de positions (abscisse – ordonnée) et cinq agents variant la saturation et la brillance de leur ton de couleur. Deux états du système à des temps différents dans le déroulement de l'animation ont été captés.



Fig. 14. Représentation du modèle *Proies-Prédateurs* avec cinq agents par superpositions de deux visualisations dans un espace de positions et par sections de couleurs.

Ces quelques exemples me semblent suffisants pour laisser imaginer la richesse des possibilités de « jeu » sur la multiplicité des paramètres à mobiliser pour faire varier visuellement l'état des éléments-agents ainsi que les dynamiques d'émergences possibles d'un même modèle. La constitution de cette série d'animations en programmes exécutables – et non en vidéos de durée déterminée – est particulièrement bien adaptée à la réalisation de « Tableaux-systèmes dynamiques infinis » sous la forme d'installations artistiques où chaque « tableau » peut entrer en résonance avec les autres dans une symphonie formelle et colorée.

2.3. Développements futurs

2.3.1. Phénomènes de résilience

A ce stade de réalisation du projet *Emergillience*, beaucoup reste encore à explorer et à mettre en œuvre en regard des potentialités soulevées par les promesses des « esquisses » déjà réalisées. Une nouvelle piste à envisager est de travailler à partir d'autres modèles de simulation que le modèle *Proies-Prédateurs* ou d'inventer des modèles originaux. Il reste également à travailler sur la construction et la modélisation des capacités de résilience des micro-univers créés. En effet, une fois que le système s'est auto-organisé en acquérant de nouvelles propriétés et qu'il s'est stabilisé dans un état d'équilibre, il s'agit de trouver des modes de perturbation du système modélisé afin d'expérimenter cette notion de résilience et de la traiter de manière esthétique au sens étymologique du mot grec *aisthesis*, qui signifie beauté au sens commun mais avant tout : sensation. Il s'agit, en effet, dans cette recherche de mettre au service de la science du sensible la science informatique, le code, les algorithmes et le calcul machinique. Pour cela il nous faut introduire dans les modèles de simulation la création de perturbations dans l'équilibre obtenu, tel qu'il est donné à voir par un observateur au bout d'un certain nombre d'itérations. Ceci afin de travailler sur la génération de processus d'évolution permettant de faire percevoir la capacité d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser et à retrouver son équilibre – tel qu'il était auparavant ou en tout cas proche de son état antérieur –, ce qui est la qualité même de la faculté de résilience. Ce thème de la résilience me paraît d'une pertinence aiguë dans l'étude et l'observation des communautés humaines car elle décrit un grand nombre de situations individuelles ou collectives de nos sociétés actuelles, de plus en plus souvent mises à l'épreuve par des chocs de natures diverses (crises sociales comme celle des « gilets jaunes » qui a secoué la France de novembre 2018 au printemps 2019, crise écologique et climatique, terrorisme ou crise sanitaire mondiale comme celle que nous vivons actuellement à l'heure où j'écris ces lignes, due à un virus biologique : le coronavirus). Ce terme de

résilience convient aussi bien à des individus isolés qu'à des groupes et ce, dans des écosystèmes différents : physique, écologique, biologique, médical, géographique, économique, psychologique ou même artificiel comme Internet et les réseaux sociaux etc.

Pour travailler cette notion de résilience, il faudrait pouvoir modéliser des chocs de deux façons : soit internes au système lui-même, en jouant par exemple sur le potentiel énergétique des entités (les éléments-agents) le composant, ou d'autres facteurs modifiant les propriétés internes du système ; soit externes au système, comme des modifications de son environnement et, pourquoi pas, d'actions grâce à des interfaces homme/machine de la part des lecteurs de l'image animée. Ceux-ci deviendraient à la fois observateurs de l'auto-organisation du « Tableau-système dynamique » et perturbateurs par une interaction gestuelle (ajouts d'agents, modulation de paramètres de comportements etc.) puis à nouveau témoins des capacités du système à se réorganiser.

2.3.2. L'œuvre comme système complexe vivant

Pour mener à bien le développement du projet *Emergilience* vers l'expression de sa composante de « résilience », il paraît nécessaire de renforcer la caractérisation de l'œuvre comme système « vivant ». En effet, comme dans l'embryogenèse qui décrit le processus de fabrication d'un être humain mais pas l'être humain lui-même, l'important dans ce genre de création n'est pas le résultat formel mais le processus par lequel les éléments de composition interagissent de manière dynamique pour rendre visible l'apparition de structures coloro-formelles qui s'organisent et évoluent de manière elle aussi dynamique. Pour Guillaume Hutzler (Hutzler, 2011, p. 10), qui s'exprime au sujet de l'œuvre qu'il a co-réalisée avec le plasticien Bernard Gortais, *Quel temps fait-il au CapLan ?* : « On observe donc un glissement depuis un art qui s'intéresse à la composition d'images vers un art qui s'intéresse à des processus susceptibles de composer des images. » Et il ajoute (Hutzler, 2011, p. 11) : « Et puisqu'il s'agit d'œuvres infinies, il est nécessaire à la fois qu'elles se régénèrent sans cesse de manière à introduire de la nouveauté, et qu'en même temps elles restent structurellement stables. » Pour ma part, continuant à filer la métaphore du vivant, je dirai que les « Tableaux-systèmes dynamiques infinis » deviennent des systèmes autopoïétiques. On doit le concept d'autopoïèse¹³ à deux biologistes chiliens : Humberto Maturana et Francisco J. Varela, qui ont forgé ce terme dans l'article *Autopoietic Systems*, présenté dans un séminaire de recherche de l'université de Santiago en 1972. Ils développeront ensuite cette notion dans un ouvrage co-écrit (Maturana et Varela, 1994) en définissant le principe d'autopoïèse comme un réseau de transformations dynamiques qui fabrique ses propres composants (métabolisme) et qui construit une barrière topologique (membrane). C'est à travers ce concept que Francisco J. Varela a étudié les phénomènes d'auto-organisation et d'autonomie du vivant (Varela, 1989). Dans le contexte de l'organisation des systèmes vivants, tels que les a définis Francisco J. Varela, les composantes physiques forment la « structure » du système. Les relations entre les constituants physiques en constituent l'organisation. Cette organisation se maintient par la production incessante de ce que Francisco J. Varela nomme la « clôture opérationnelle », qui la fait résister aux perturbations générées par le milieu. Cette « clôture opérationnelle » a une double fonction : elle définit un espace physique délimité par une frontière dynamique et elle permet la régénération des composants physiques. Le concept d'autopoïèse rend compte de ces deux propriétés. L'autopoïèse est le modèle d'organisation d'un réseau dans lequel chaque composant doit participer à la production ou à la transformation des autres. La « clôture opérationnelle », qui circonscrit le réseau de transformations, contribue au maintien de sa structure et de son organisation, participant ainsi à son autoproduction. Comme chaque composant est produit ou simplement transformé par les autres composants du même réseau, le système entier est clos sur le plan de l'organisation. Cependant, il reste ouvert par rapport à l'environnement, assurant la circulation d'énergie et de matière nécessaires au maintien de

¹³ Vient du grec : *autos*, de soi-même, de lui-même et *poiésis* : création ou production, action de faire.

son organisation et à la régénération continuelle de sa structure. Il semble donc intéressant dans les développements futurs du projet *Emergilience* de pouvoir s'appuyer sur de telles conceptions qui permettront de créer des systèmes computationnels autopoïétiques, à la fois fermés et ouverts : clos sur le plan de l'organisation, mais ouverts à leur environnement afin de pouvoir ajouter aux réalisations génératives déjà créées, le traitement de phénomènes de résilience (Lavaud-Forest, 2012, p. 400-401). Pour cela, nous l'avons dit, il faudra introduire des perturbations dans les états de stabilités émergents. Pour Guillaume Hutzler (Hutzler, 2011, p. 12), la difficulté est de maintenir un intérêt plastique et esthétique pour la simulation du déséquilibre et du chaos : « L'œuvre doit pour cela faire preuve d'homéostasie, c'est-à-dire avoir la capacité, de par ses mécanismes autorégulateurs internes, de conserver son équilibre de fonctionnement en dépit des contraintes qui lui sont extérieures. Autrement dit, les mécanismes génératifs mis en œuvre, les interactions entre éléments plastiques, doivent assurer que l'œuvre reste toujours intéressante à regarder en dépit des perturbations qu'elle subit. » Dans la suite du projet, une autre piste à envisager pour améliorer la conception des simulations des modèles, est d'introduire différents niveaux d'organisation ou d'échelle spatiale et temporelle pour les éléments et les structures des systèmes. Pour Guillaume Hutzler (Hutzler, 2011, p. 37), il s'agit donc de faire appel à des modèles et des simulations « multi-niveaux » : « ... en travaillant à différents niveaux d'échelles, et en articulant le passage entre niveaux, le propos est également d'aller vers la conception de modèles à base d'agents multi-niveaux dynamiques. » Pour cela, il préconise de pouvoir dépasser le seul recours à une approche à base d'agents : « Corrélativement, il peut dans certains cas être souhaitable de sortir du strict cadre de l'approche à base d'agents au profit d'approches hybrides mêlant le paradigme agent avec d'autres paradigmes de modélisation. »

On le voit, le chantier est vaste et les promesses enthousiasmantes, tant les possibilités qu'offre à l'artiste la recherche en matière de conception de programmation informatique avancent et peuvent proposer des solutions pertinentes aux enjeux artistiques.

3. En guise de conclusion prospective

L'un des enjeux qui se profile à l'horizon de cette recherche, serait l'écriture de ce que j'appellerai pour l'instant, faute de mieux, un « Traité de modélisation de tableaux-systèmes dynamiques infinis » que Wassily Kandinsky (Kandinsky, 1991) avait prophétisé sous la forme de la « formulation numérique » liée aux « possibilités de mensuration ». Ce traité serait une sorte de pendant cybernétique à son « traité de composition », qui élabore une théorie des formes analysant l'organisation structurelle des lois de mise en scène des éléments de la peinture que sont le Point et la Ligne au sein de ce qu'il nomme le « Plan Originel » (P.O.). Il formulerait l'élaboration d'une méthode d'investigation de l'organisation structurelle de pièces artistiques composées – pour reprendre l'analogie terme à terme : d'Agents en Interaction dans un Système complexe (Lavaud-Forest, 2012 p. 328-336).

Afin de satisfaire des objectifs artistiques, il ne s'agit pas ici de valider la solidité et la robustesse d'un modèle du point de vue scientifique ni de vérifier sa fonctionnalité en tant que simulation-miroir de modèles naturels (ou même artificiels mais tangibles comme Internet). Il ne s'agit pas non plus de tester ses capacités de prédiction d'évolution afin d'aider à la résolution de problèmes d'ordre concret. Mais il s'agit plutôt d'étudier l'impact sur la perception visuelle d'un observateur (possiblement aussi « acteur ») d'un jeu sur différents paramétrages de modélisation puis de simulation et enfin de leur visualisation sous la forme de micro-univers dynamiques. Cette modulation de différents paramètres (nombre d'agents, types d'agents, quantité et qualité des états, seuils de passage d'un état à un autre, niveaux d'énergie, vitesse, règles de comportements, conditions initiales, nombre d'itérations etc.) permettant ainsi d'induire des constructions sémantiques variées au service de la création de sens. Il s'agit d'explorer et d'analyser les différents moyens langagiers dont le créateur dispose pour nourrir sa quête : modéliser des concepts d'ordre

philosophique, psychologique, spirituel voire métaphysique ou cognitif, qui de tout temps ont été mis à l'épreuve de la *technè* pour interroger les notions de réalité, espace, temps, mémoire, perception, matière, forme, etc. Il s'agit aussi d'étudier la manière dont le choix de ces moyens influence, non seulement les processus de réception d'un observateur, mais aussi leurs effets les uns sur les autres. Quelles sensations perceptives induisent-ils ? Comment les manipuler ? Comment les visualiser ?

Nous avons vu que les états variables des entités peuvent porter sur différents paramètres comme leur position dans l'espace (abscisse, ordonnée), leur forme (ronde, pointue, carrée, rectangulaire), leur taille (grande, petite), leur couleur (foncée, claire, chaude, froide, lumineuse, grise, terne), leur saturation (forte, faible, moyenne), leur luminosité (faible, forte, intermédiaire), leur vitesse (forte, faible, accélérée, décélérée) etc. Il existe également une infinité d'habillages possibles pour les agents et leur environnement : flou, net, clignotant, rigide, élastique, géométrique, déformé etc.

La création de ces mondes artificiels en perpétuelle évolution que sont les « Tableaux-systèmes dynamiques infinis », fait appel à l'invention de nouvelles configurations spatio-temporelles. La matière s'organise : le processus évolutif est plus intéressant que le résultat. C'est le processus qu'il faut pouvoir observer : rendre visibles des processus invisibles, sous-jacents, de générations de forme. Ceci nous interroge : ce que nous percevons ne serait-il qu'une infime partie (4% affirment certains physiciens quantiques) de la réalité ? Un niveau de réalité parmi tous les niveaux possibles que la limitation de nos sens et de notre conscience étroite nous masque ? Le recours à des technologies de simulation par l'exécution de programmes informatiques, domaine privilégié du traitement de l'information, offre donc à l'artiste des outils d'expression en adéquation avec les avancées actuelles de nos connaissances. Selon la physique quantique, la matière est de l'énergie agglomérée et l'énergie est de l'information. La matière/information s'organise et produit la vie. Tout comme lorsque l'on recourt à la programmation procédurale, l'algorithme crée l'information (sans base de données préexistantes). Dans ce cas, on est dans la création pure, il n'y a pas d'information préalable. L'algorithme crée la forme. Il informe au sens aristotélicien du terme de « donner forme ». Si l'on considère l'animation générative comme un micro-univers artificiel en perpétuelle évolution, on peut imaginer que l'espace dans lequel baignent les particules (éléments) est constitué de petites entités porteuses et émettrices d'information dont le comportement influence la nature de l'univers. Tout est connecté. Tout est relié. Un comportement à un endroit d'un élément local influence la configuration de l'ensemble du système. Tout influence tout dans l'univers et tout informe tout. Le monde est vibratoire. Le monde est énergie. La création (de l'univers, d'une forme, d'une structure, d'une propriété) est la connexion de chaque point avec tous les autres points. Leurs interrelations. Chaque atome est en relation avec le reste de l'univers et reçoit l'information du reste de l'univers. C'est de cela aussi dont il est question dans le projet *Emergience*.

Bibliographie

- Bobo L., *Création de formes par des phénomènes d'émergences, et transposition à l'écriture pour la performance*, (mémoire de stage, Master 2 Art, Science, Technologie, INP Phelma, cole Nationale Supérieure de physique, Électronique, Matériaux, Grenoble), 2016.
- Boissier J.-L., *La relation comme forme - L'interactivité en art*, Mamco, Genève, 2004.
- Bonabeau E., Dessalles J.-L., Grumbach A., "Characterizing Emergent Phenomena (1): A Critical Review", *Revue Internationale de Systémique*, 9 (3), (1995), p. 327–346.
- Briot J.-P., Demazeau Y. (sous la direction de), *Principes et architecture des systèmes multi-agents*, coll. Lavoisier, Hermès Sciences, Paris, 2001.
- Couchot E., Hillaire N., *L'art numérique - Comment la technologie vient au monde de l'art*, Flammarion, Paris, 2003.
- Deguet J., Magnin L., Demazeau Y., "Elements about the Emergence Issue: A Survey of Emergence Definitions", *ComPlexUs*, 3, 2006, p. 24–31.

- De Wolf T., Holvoet T., “Emergence Versus Self-Organisation : Different Concepts but Promising When Combined”, Dans *Engineering Self-Organising Systems: Methodologies and Applications* (dir. Sven A. Brueckber et al.), 2009, p. 1–15.
- Drogoul A., *De la simulation Multi-Agents à la résolution collective de problèmes – Une étude de l’émergence de structures d’organisation dans les Systèmes Multi-Agents* (thèse de doctorat), université Paris VI, 1993.
- Duguet A.-M., *Déjouer l’image*, éditions Jacqueline Chambon, Paris, 2002.
- Gerhardt M., Schuster H., “A cellular automaton describing the formation of spatially ordered structures in chemical systems”, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 36(3), 1989, p. 209-221.
- Goldstein J., *Emergence as a Construct : History and Issues*, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., New Jersey, États-Unis, 1999.
- Grignard A., *Modèles de visualisation à base d’agents* (thèse de doctorat), université Pierre et Marie Curie, Paris, 2015.
- Hutzler G., *Du Jardin des Hasards aux jardins de données : une approche artistique et multi-agent des interfaces homme/systèmes complexes*, (thèse de doctorat), université Paris 6, LIP6, Paris, 2000.
- Hutzler G. *Le Has(Art) et la néce(Cité) – Une approche (auto-)poïétique des systèmes complexes* (thèse d’Habilitation à Diriger des Recherches), université d’Evry-Val-d’Essonne, 2011.
- Kandinsky W. *Point et ligne sur plan - Contribution à l’analyse des éléments de la peinture*, Nouvelle édition établie, présentée et annotée par Philippe Sers, Gallimard, Paris, 1991.
- Lavaud-Forest S., *De la peinture aux scénographies interactives. Un changement de paradigme dans les systèmes de représentations artistiques*, éditions Universitaires Européennes, 2012. Publication de la thèse de doctorat : *Scénographies interactives, Corps interfacés et systèmes dynamiques*, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2005.
- Lestocart L.-J., *Artistes et ingénieurs - Le paradigme de l’émergence et la genèse des univers distribués*, (thèse de doctorat), université Paris 8, 2005, p. 495-523.
- Lotka A. J., *Elements of Physical Biology*, 1925 (réimpr. Nabu Press, USA, 2011).
- H. Maturana H., Varela F, *L’arbre de la connaissance*. Addison-Wesley France, Paris, 1994.
- De Mèredieu Florence, *Histoire matérielle et immatérielle de l’art moderne et contemporain*, Larousse, Paris, 2004.
- Panofsky E., *La perspective comme forme symbolique et autres essais*, éditions de Minuit, Paris, 1975.
- Popper F., *Art, action et participation 1, Le déclin de l’objet*, éditions du Chêne, Paris, 1975.
- Rosenzweig M. L., MacArthur R. H., “Graphical Representation and Stability Conditions of Predator-Prey Interactions”, *Amer. Natur.* 97, 1963, p. 209-223.
- Varela F. J., *Autonomie et connaissance, Essai sur le vivant*, trad. De l’américain par Paul Bourguine et Paul Dumouchel, Le Seuil, Paris, 1989.
- Volterra V., Brelot M., *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie*, Gauthier-Villars, Paris, 1931, (réimpr. éd. Jacques Gabay, Paris, en 1990).

Site web :

<http://www.espace-turing.fr/Sur-les-modeles-proie-predateur-en.html>