

Nature & Design

Dans quelles mesures le vivant inspire-t-il les artistes
et les designers à travers le temps ?

Baptiste Lefebvre
Dmii 2021

Sommaire

Introduction

I. Observer et comprendre le vivant

I.1 La nature, le vivant et l'Homme 5

I.2 L'art, la beauté et la nature 9

II. Reproduire le vivant à l'heure du numérique

II.1 Modéliser l'évolution 13

II.2 Les effets inspirés du vivant dans les outils de création numérique 17

II.3 Houdini et la génération procédurale 30

III. S'inspirer du vivant pour imaginer le monde de demain

III.1 Le biomimétisme 33

III.2 Imaginer et anticiper le futur 37

Conclusion

Interview

Remerciements

Bibliographie

Introduction

En observant une certaine récurrence dans mes projets à faire appel à des inspirations issues du monde du vivant, je souhaite profiter de ce mémoire pour mieux comprendre la place de la nature au cœur de la création. Quel rapport avons-nous eu avec le vivant au cours du temps ? Quels artistes s'inspirent du vivant, et pourquoi ? Comment reproduire numériquement les motifs que l'on retrouve dans la nature ? Quels sont les enjeux qui gravitent autour du vivant ? Quel rôle avons-nous à jouer en tant qu'artiste et designer, pour imaginer le monde de demain ? Nous chercherons à répondre à ces questions à travers la problématique suivante :

Dans quelles mesures le vivant inspire-t-il les artistes et les designers à travers le temps ?

Premièrement, nous étudierons l'évolution du rapport entre l'Homme et le vivant : comment l'a-t-il observé, analysé et étudié afin de mieux comprendre ses mécanismes et son fonctionnement. Avec le temps, l'Homme apprendra à admirer la beauté et la complexité de la nature, nous déterminerons de quelles manières le vivant a inspiré les artistes dans le passé, jusqu'à aujourd'hui.

Ensuite, nous chercherons à comprendre comment reproduire le vivant, à l'heure du numérique. À travers l'étude de quatre motifs naturels que nous chercherons à retranscrire numériquement, nous analyserons la place du vivant dans les outils de création numérique. Nous expérimenterons le logiciel de génération procédurale *Houdini*, pour proposer des solutions à des problèmes que j'ai pu observer dans mon expérience professionnelle.

Enfin, nous proposerons une approche biomimétique pour anticiper notre futur en prenant en compte les enjeux actuels de notre société et les défis qui nous font face. Comment les artistes et les designers d'aujourd'hui peuvent-ils s'inspirer du vivant pour imaginer le monde de demain ?

I. Observer et comprendre le vivant

I.1 La nature, le vivant et l'Homme

D'un point de vue biologique, la nature englobe l'ensemble des systèmes et phénomènes naturels que l'on observe sur Terre. On y retrouve l'environnement, l'habitat, les paysages, les milieux (l'eau, l'air, le sol...), les forces (physiques, géologiques, biologiques...) et les différents groupes d'espèces (animale, végétale, fongique...).

Le vivant est la manifestation de la vie à travers des structures appelées "organismes vivants", ou "êtres vivants", caractérisées par leur grande complexité et leur activité autonome : ils agissent selon leurs propres déterminations. Certains phénomènes, comme la régénération, la reproduction et l'évolution, sont caractéristiques du vivant. Contrairement aux objets inertes, l'organisme vivant a un corps qui forme lui même sa propre substance.

Il existe plusieurs formes de vie, qui se classent en six règnes :

- **Archéen** (qui regroupe les micro-organismes unicellulaires procaryotes : une seule cellule sans noyau).
- **Bactérien** (organismes vivants, microscopiques et procaryotes. Ils sont présents dans tous les milieux).
- **Protiste** (terme qui désigne les micro-organismes eucaryotes unicellulaire, avec noyau et organites qui leur permettent de respirer. Ils sont les premiers organismes que l'on considère comme vivant).
- **Champignon** (eucaryotes uni ou pluridisciplinaires).
- **Plante** (organismes photosynthétiques et autotrophes : ils synthétisent et produisent de la matière organique).
- **Animal** (être vivant complexe, multicellulaire et hétérotrophe : il se nourrit de substances organiques).

D'un point de vue philosophique, la nature englobe tout ce qui ne dépend pas de l'Homme, ou qui n'est pas modifié par son travail. La nature vient donc s'opposer à la culture, qui au contraire, englobe tous les produits de l'action humaine : les institutions, la technique et les œuvres d'art et de l'esprit. Bien que l'être humain fasse partie de la nature car il se classe dans le règne animal, la culture semble faire rupture entre lui et elle. Effectivement, l'Homme cherche à s'émanciper du règne animal, comme peuvent en témoigner les représentations picturales paléolithiques dans la grotte de Chauvet (**fig 1**), où l'Homme dessine les animaux qui l'entoure, sans y inclure sa propre image. L'Homme pense surpasser les animaux, car il se crée et s'invente, il compense ses défauts naturels par la technique. Par exemple, l'Homme n'est pas doté d'ailes, mais il prend son envol grâce à différents moyens, comme le montrent les recherches de *Leonard De Vinci* sur les premiers prototypes de machines volantes (**fig 2**), inspirées des mouvements d'ailes des oiseaux. La nature s'arrête donc là où l'humanité commence, l'Homme *a cultivé et humanisé la nature*¹ et se l'est appropriée par le travail, la technique et le langage.



(fig 1) Dessins Paléolithiques de la grotte de Chauvet



(fig 2) Dessins techniques d'une machine volante, L. De Vinci

Pour Aristote, la *nature ne fait rien en vain*². Il y aurait une finalité, un but, chez les êtres vivants : la vie. En effet, dans un organisme il y a plusieurs fonctions qui permettent de maintenir la vie. Les différents organes sont des moyens, qui ont chacun un but : les poumons servent à respirer, l'œil sert à voir... Ensemble, ces organes synergisent de manière coordonnée, pour agir vers une fin commune : la vie. Tout cela fascine l'être humain qui est en admiration devant ce principe, que l'on qualifie de *miracle de la vie*³. Afin de mieux comprendre ces mystérieux objets que sont les organismes vivants, Descartes développe une théorie au XVIIème siècle, selon laquelle il faut considérer les êtres vivants comme des machines pour pouvoir les expliquer scientifiquement. Grâce à ce savoir scientifique, l'Homme pourra se positionner comme *maître et possesseur de la nature*⁴,

1 The Concept of Nature in Marx by Alfred Schmidt (2014 [1971])

2 Aristote, Génération des animaux (330 av. J-C)

3 Jacques Monod, biologiste, dans Le hasard et la nécessité (1970)

4 Descartes, dans Discours de la méthode (1637)

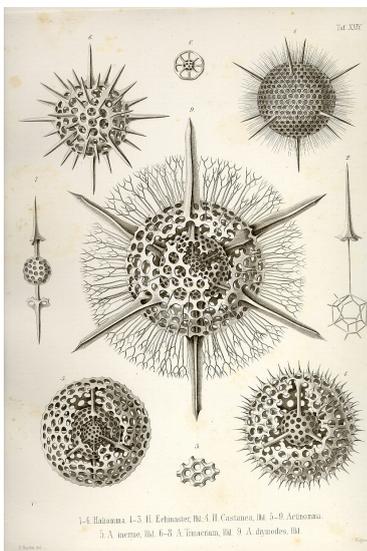
dans l'intérêt d'une approche objective de la connaissance. Avec cette théorie, Descartes cherche à comprendre comment la nature fonctionne et non pourquoi elle fonctionne. Il rejette alors la doctrine du finalisme proposée par Aristote et marque ainsi la naissance de la science moderne et du mécanisme.

Plus tard, au XIX^{ème} siècle, Charles Darwin explique que les espèces dérivent toutes les unes des autres et donc dérivent toutes d'un ancêtre commun, qui vivait manifestement dans l'eau. Son hypothèse est que l'évolution se produit sous l'effet d'un mécanisme : la sélection naturelle. Dans *L'origine des espèces*, Darwin observe que le travail des éleveurs est de sélectionner les meilleurs animaux à partir d'un certain point de vue : les vaches qui produisent le plus de lait, les chiens qui courent le plus vite... Puis, ils éliminent les individus défaillants par rapport aux normes qu'ils ont choisies et ne conservent que les individus les plus compétitifs, qu'ils font se reproduire entre eux. Avec le temps, les propriétés de performance se renforcent et les propriétés défaillantes disparaissent. Ainsi, les éleveurs créent le concept artificiel de race. La nature utilise le même mécanisme : lors de la reproduction, des mutations aléatoires se produisent. Certaines de ces variations favorisent les individus qui les portent et favorisent ainsi leur survie. Après reproduction, ces différences sont renforcées. Par exemple, les animaux qui avaient de longs cous pouvaient mieux s'alimenter que les autres, ils ont alors été favorisés dans la lutte pour la survie. Comme ils se reproduisent entre eux, cet attribut s'amplifie : le cou des girafes s'est progressivement allongé alors qu'au départ, il devait ressembler plutôt à celui d'un zèbre. Ces petites différences favorables, découlent du mécanisme de la sélection naturelle : ce sont des buts (non intentionnels), qui ont comme fin (intentionnelle) la survie. À partir de cette observation, Charles Darwin propose en 1859 une théorie qui explique que les espèces animales et végétales ont dû évoluer pour survivre en s'adaptant aux variations de leur environnement : c'est la théorie de l'évolution.

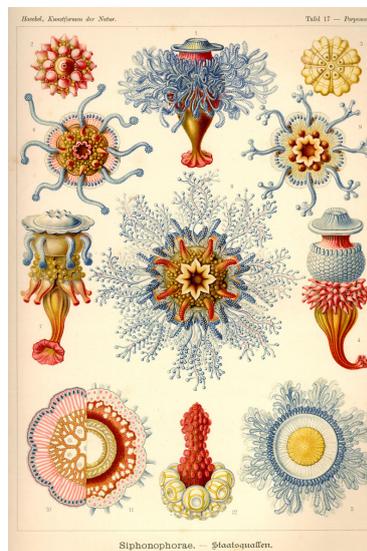
Au même moment, un certain *Ernst Haeckel*, biologiste et philosophe allemand, prend connaissance des idées de Darwin sur l'origine des espèces. Il participera à approfondir la théorie de l'évolution et à la populariser en Allemagne, notamment en étudiant les rapports entre les organismes vivants et leur environnement. En parallèle, Ernst Haeckel participe à une mission de recherche scientifique dans le Golf de Messina où il s'intéresse particulièrement aux *radiolaires*, des organismes marins qui font partie de la famille du *zooplancton*⁵ et en découvre une centaine de nouvelles espèces. Fasciné par la variété, la beauté et la symétrie des formes des radiolaires, ainsi que la complexité et la richesse de leurs structures en silicium, il les répertorie et les dessine dans une monographie qui nommera *Die Radiolarien* (**fig 3**). Ses publications et ses dessins fascinent la communauté scientifique, ce qui lui ouvre de nouvelles opportunités pour de

5 Le plancton est un organisme unicellulaire qui vit dans les eaux douces. Il existe deux types de plancton : le plancton animal (zooplancton) et le plancton végétal (phytoplancton) qui à lui seul produit 50% de l'oxygène dans l'atmosphère, grâce à la photosynthèse.

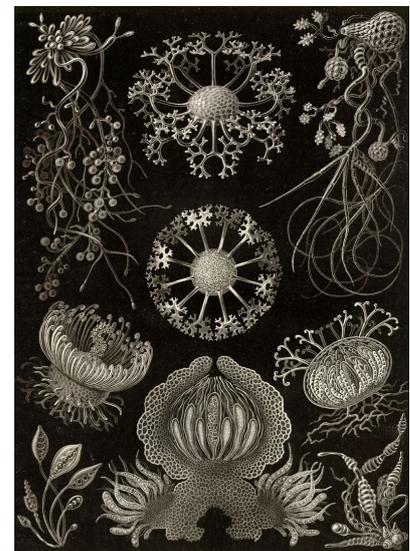
nouveaux voyages de recherches. Il participe à l'expédition à bord du navire britannique *Challenger* et découvre plusieurs espèces sous-marines, notamment les *siphonophores*⁶ (fig 4). Haeckel est frappé par la grâce et la beauté de toutes ces formes animales ; il décide alors d'illustrer plusieurs de ces espèces et de les regrouper dans un ouvrage. Plusieurs années de travail plus tard, il publie "*Kunstformen der Natur (Art forms in Nature)*" qui regroupe une centaine d'illustrations d'espèces animales et végétales (fig 5). Cette fois, son but n'est pas que scientifique mais il est aussi esthétique ; il souhaite rendre accessible les trésors et la beauté de la nature au grand public. Fort de son succès, *Art forms in Nature* incitera par la suite de nombreux artistes à s'inspirer du vivant dans leurs créations.



(fig 3) Illustration de radiolaires, issue du livre d'Ernst Haeckel : Die Radiolarien (1862)



(fig 4) Illustration de siphonophore, issue du livre d'Ernst Haeckel : Kunstformen der Natur (1900)



(fig 5) Illustration issue du livre d'Ernst Haeckel : Kunstformen der Natur (1900)

6 Siphonophores : ordre d'organismes de zooplancton qui vivent en colonies.

I.2 L'art, la beauté et la nature

L'imagerie d'Ernst Haeckel représentant la faune et la flore sous-marine marquera les esprits de nombreux artistes dans la fin du XIX^{ème} siècle, qui feront régulièrement référence à ses ouvrages dans leurs écrits. C'est le cas de l'artiste *Constant Roux*, qui a réalisé les grands lustres en forme de méduse pour le musée océanographique de Monaco (fig 6), ou l'architecte *René Binet*⁷ qui s'inspira, entre autres, des travaux d'Haeckel pour réaliser la *Porte monumentale* (fig 7), l'une des œuvres majeures de l'exposition universelle de 1900 à Paris. Ces œuvres sont les fondements d'un nouveau mouvement artistique qui tend à s'inspirer de la nature et de ses lignes courbes, des ses couleurs désaturées et de ses formes flottantes : c'est l'*Art Nouveau*⁸. Ce mouvement s'oppose fondamentalement à l'industrialisation que traverse la société depuis quelques années déjà. Il s'oppose à la fabrication à la chaîne et à la production de masse, en proposant des œuvres d'art spontanées d'une extrême richesse. Plusieurs domaines artistiques s'approprient ce mouvement : l'architecture, le design d'intérieur, le design d'objet, la joaillerie ou le design graphique. Tous ces domaines tendent vers des buts communs : l'harmonie et la continuité ; rendre l'espace agréable et favorable à l'épanouissement des hommes et des femmes modernes. Pour rendre cela possible, s'inspirer de la nature semble être primordial car elle représente à cette époque la modernité (grâce aux récents travaux de Haeckel), mais elle est aussi un modèle de la beauté parfaite : un idéal à atteindre.



(fig 6) Le lustre en forme de méduse, conçu par Constant Roux



(fig 7) La porte monumentale, construite par René Binet, pour l'exposition Universelle de Paris (1900)

7 René Binet (1866-1991) architecte français, peintre et théoricien de l'art.

8 L'Art nouveau est un mouvement artistique entre 1890 et 1910, qui s'inspire de l'esthétique des lignes courbes.

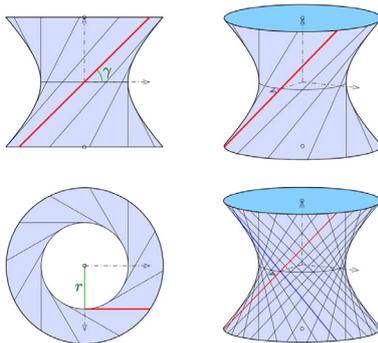
Les notions de beauté et d'idéal semblent difficile à définir car ce sont des notions abstraites qui varient selon les époques et les individus. D'une manière générale, le beau fait naître un sentiment esthétique chez la personne qui le perçoit. On peut qualifier de "beau" un objet ou un être vivant qui correspond à un type d'idéal et à la perfection en son genre, qui obéit à certaines formes d'équilibre ou d'harmonie. Au cours de l'histoire, les codes de la beauté ont bien changé. Les idéaux ont évolué, parfois dans le sens opposé, mais au delà des goûts individuels et contemporains, certaines choses ne se sont jamais démodées, par exemple : le ratio du nombre d'or, la symétrie, ou les motifs fractals, peuvent être trouvés dans l'art et l'architecture de toutes les cultures de nos origines jusqu'à aujourd'hui. Le célèbre *nombre d'or*⁹, appelé aussi *proportion divine*, est une proportion géométrique particulièrement esthétique qui se retrouve dans de nombreuses architectures de différentes époques. Bien qu'il soit délicat d'affirmer que cette proportion ait été utilisée intentionnellement par les constructeurs, on retrouve ses propriétés notamment dans la pente de la *Pyramide de Khéops* (époque Antique), dans les dimensions de *Parthénon d'Athènes* (époque Classique), dans la façade de la *cathédrale de Laon* (époque du Moyen-Âge) ou plus récemment dans les systèmes modulaires de *Le Corbusier* (époque Moderne). Ce dernier théorisa l'usage du nombre d'or dans l'architecture, consistant à proportionner un bâtiment aux dimensions du corps humain, s'appuyant sur les proportions décrites par *Vitruve* dans son traité *De Architectura*, en prenant en compte les rapports du nombre d'or. Les êtres humains semblent tout de même avoir certaines attirances communes concernant la beauté et l'esthétisme. Au fil du temps, ce nombre d'or est utilisé plus largement dans plusieurs formes d'art et de créations de l'Homme ; on le retrouve dans la peinture, dans l'artisanat, dans la musique ou plus récemment dans le design graphique. Mais on peut également trouver cette proportion dans la nature, notamment dans la spirale que forment les écailles de pommes de pin, dans le cœur des fleurs de tournesol ou dans les cristaux de quartz.

Au-delà du simple aspect esthétique, les formes de la nature ont indirectement aidé nos ancêtres à survivre. La symétrie, par exemple, est un principe récurrent dans le monde du vivant, qui signifie que tout est à sa place : les tiges, les fleurs et les feuilles grandissent et éclosent souvent de manière symétrique et harmonieuse. Pour l'Homme, reconnaître les formes de la nature et les comprendre était capital pour sa survie. Un brin de blé déformé et asymétrique pouvait représenter un danger à la consommation, en revanche, un fruit bien formé avec une couleur vive pouvait être perçu comme une source nutritive fiable. La symétrie se retrouve aussi dans les visages et pouvait être interprétée comme un signe de bonne santé. C'était donc un critère important pour choisir son partenaire pour la reproduction, comme nous l'avons vu avec le mécanisme de sélection naturelle. La symétrie est très familière pour notre cerveau car elle se retrouve partout

9 Le rapport du nombre d'or peut se définir par l'équation suivante : $(a+b)/a = a/b$. Le nombre d'or est souvent désigné par la lettre ϕ (phi) qui représente l'angle d'or, qui est égale à environ 1.61803.

dans la faune et la flore, au même titre que les fractales (structures qui se répètent de manière similaire à plusieurs échelles) que l'on retrouve dans les nuages ou dans les vagues de la mer. Savoir identifier leurs formes permet d'anticiper, par exemple, si des nuages vont apporter de la pluie ou si des vagues sont dangereuses pour la navigation. Ainsi, les formes de la nature ont aidé l'être humain à évaluer son environnement plus facilement et à réagir plus rapidement au danger.

L'être humain a donc toujours été confronté aux formes de la nature, qui représentent un modèle de beauté et d'idéal à travers le temps. Pour de nombreux artistes, la nature est une source inépuisable d'inspiration pour la création de leurs œuvres d'art. On peut notamment citer le célèbre architecte espagnol *Antoni Gaudí*, qui a développé son propre style, le *modernisme*¹⁰, basé sur l'observation de la nature, de ses couleurs et de sa géométrie. C'est en observant autour de lui dans la montagne de Montserrat en Espagne, qu'il s'intéressa aux structures des arbres, des joncs, des roseaux et des os. Il a ainsi découvert des formes géométriques réglées, comme le paraboloïde hyperbolique, l'hyperboloïde (**fig 8**), l'hélicoïde et le conoïde. Ces formes sont générées à partir d'une droite appelée *génératrice*, qui se déplace sur une ou plusieurs lignes *directrices*. Gaudí trouve ces formes fonctionnelles car elles ont des structures très robustes, mais aussi très esthétiques. Il a su transcrire le langage de la nature et le transposer dans l'architecture : il associe par exemple la forme de l'hélicoïde au mouvement, et la forme de l'hyperboloïde à la lumière. Gaudí a notamment appliqué ses analyses et ses observations de la nature dans son œuvre phare ; la *Sagrada Família*, qui est conçue selon la structure d'une forêt avec un ensemble de colonnes arborescentes. Ces colonnes sont divisées en plusieurs branches qui soutiennent une structure faite de voûtes en hyperboloïdes (**fig 9**), qui laissent passer la lumière. Les colonnes sont légèrement inclinées pour mieux supporter la pression qu'elles reçoivent ; elles forment individuellement des structures hélicoïdales autoportantes, à l'image des arbres,



(fig 8) Forme hyperboloïde, que l'on retrouve dans la forme de certains troncs d'arbre.



(fig 9) Voûte de la tour de la vierge Marie qui illumine l'autel de la Sagrada Família.

10 Mouvement artistique Catalan, dans la continuité de l'Art Nouveau.

qui une fois ensemble créent une structure fractale. De cette manière, Gaudí est parvenu à une solution rationnelle et structurée, parfaitement logique car inspirée de la nature, créant en même temps un nouveau style architectural original et esthétique.

Bien qu'aujourd'hui la *Sagrada Familia* soit toujours considérée comme un monument exemplaire d'architecture, notre manière de construire et notre processus de création délaissent désormais la beauté et l'originalité, en faveur de l'efficacité, du coût et de la fonctionnalité. Nous construisons des étages d'immeubles bétonnés et monotones, nous avons des stations de métros lugubres, des bâtiments publics miteux et nous vivons agglutinés les uns contre les autres. Il est pourtant prouvé que l'humain n'aime pas la monotonie ; une *étude*¹¹ démontre que l'œil humain se concentre sur les détails et les ornements des architectures complexes, alors qu'il balaye rapidement les murs gris et vides. Regarder des façades vastes et ternes influence notre niveau de stress et notre rythme cardiaque, ce qui peut contribuer à affecter notre humeur. À l'inverse, un environnement esthétique et plaisant peut améliorer notre bien être, notre comportement, nos fonctions cognitives et notre humeur. Notre corps et notre cerveau réagissent de manière mesurable et visible à tout ce qui nous entoure. La beauté en particulier, a un impact fort sur notre bien être. Une autre *étude*¹² montre qu'en accrochant des œuvres d'arts sur les murs des lieux comme les salles d'attentes des hôpitaux, cela pouvait rendre le séjour des patients plus agréable.

En sémancipant des milieux naturels, nous vivons aujourd'hui dans des villes que nous avons créées de toutes pièces. Nous savons pourtant que les formes que nous observons dans la nature ont des propriétés esthétiques que notre cerveau est capable de reconnaître et d'assimiler. Nous avons conscience que ces formes ont une influence positive sur notre humeur et notre bien-être. Nous devrions sûrement lui donner une place plus importante dans les environnements que nous avons créés.

11 "Buildings, Beauty, and the Brain : A Neuroscience Architecturale experience."

University of Pennsylvania

12 "How do patients actually experience and use art in hospitals? The significance of interaction: a user-oriented experimental case study" - Stine L. Nielsen, Lars B. Fich, Kirsten K. Roessler, and Michael F. Mullins.

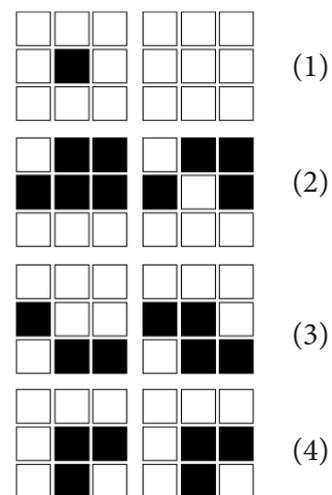
II. Reproduire le vivant à l'heure du numérique

II.1 Modéliser l'évolution

Au milieu du XXème siècle, les premiers ordinateurs font leur apparition et marquent le début de la grande révolution numérique que nous sommes encore en train de vivre aujourd'hui. La puissance de calcul de ces machines a permis notamment de simuler numériquement le vivant et explorer de nouvelles façons de concevoir.

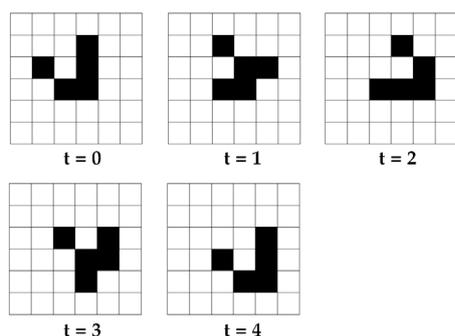
Un des premiers exemples de programme informatique explorant le principe d'évolution et de génération, est le programme "*Game of life*" créé par le mathématicien John Conway en 1970. Ce programme évolue avec des règles simplistes qui peuvent conduire à des résultats variés d'une très grande complexité. Il est considéré comme un automate cellulaire : il est représenté sous une forme de grille, composée de cases carrées blanches, qui peuvent comporter, ou non, des cellules noires qui évoluent dans le temps. Au début d'une partie, on place volontairement ou aléatoirement des cellules noires parmi les cases blanches de la grille. Ensuite, le programme fonctionne de manière autonome et les cellules interagissent entres-elles tour à tour, selon ces quatre règles élémentaires (fig 9):

- (1) **Mort** : Si une cellule est *isolée* avec une ou zéro cellule voisine, elle meurt au prochain tour.
- (2) **Mort** : Si une cellule est entourée de quatre cellules voisines ou plus, elle meurt de surpopulation.
- (3) **Naissance** : Si une case vide est entourée d'exactly trois cellules, elle fait naître une cellule au tour suivant.
- (4) **Survie** : Si une cellule a deux ou trois cellules voisines, elle survit au tour suivant.

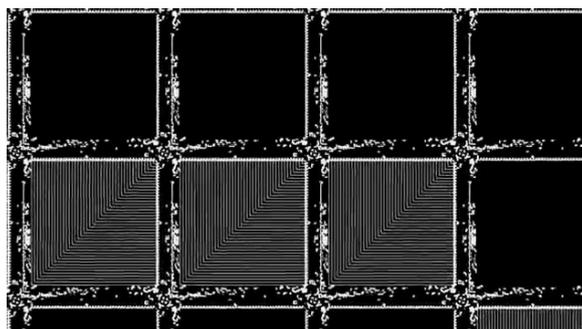


(fig 9) Les quatre règles du Jeu de la vie de John Conway.

A chaque tour, certaines cellules survivent, d'autres naissent et d'autres meurent. Des formes de vie émergent, elles évoluent générations après générations. Certaines formes se figent et n'évoluent plus aux tours suivants, sans morts ni naissance ; elles sont alors qualifiées de figures *stables*. Certaines formes oscillent entre deux positions en boucle à une période variable ; elles sont alors qualifiées de figures *oscillantes*. Plusieurs figures simples sont répertoriées car elles apparaissent fréquemment, on peut citer notamment la figure du bateau, de la ruche ou du pain. Mais une figure en particulier a révolutionné le *Jeu de la vie*, c'est le *planeur* (fig 10). Découverte par Richard Guy, un membre de l'équipe de John Conway, la figure du *planeur* se distingue des autres car elle se déplace en diagonale à l'infini. Cette figure a ouvert beaucoup de nouvelles possibilités, comme par exemple la figure du *Canon à planeur* qui génère une figure de *planeur* à intervalle régulier, comme si elle envoyait des signaux, de l'information. Au fil des années, le *Jeu de la Vie* continue à fasciner bon nombre de développeurs. Toute une communauté s'est créée ; il existe à ce jour 1 333 figures répertoriées et certaines sont encore découvertes aujourd'hui, 50 ans après la création du programme de John Conway. L'une des créations les plus impressionnantes dans le jeu de la vie est sans doute le *OTCA metapixel* (fig 11), une figure qui représente un pixel capable de recevoir de l'information grâce aux planeurs, qui peut s'allumer ou s'éteindre tel un interrupteur. En synchronisant plusieurs *OTCA metapixel*, on peut simuler le *Jeu de la vie*, dans le *Jeu de la vie* !



(fig 10) Le déplacement en 5 étapes de la figure du planeur.



(fig 11) Mise en abyme du Jeu de la vie, dans le jeu de la vie grâce à la figure OTCA metapixel.

Avec seulement quatre règles simples et déterminées, ce petit programme peut générer des résultats incroyablement complexes. C'est ce qu'on appelle l'*émergence*, un phénomène qui se manifeste quand plusieurs parties interagissent entre elles et font apparaître des propriétés ou des comportements en un tout, qui les dépassent. Le concept d'émergence peut être grossièrement résumé par la maxime : "*Le tout est plus que la somme de ses parties*". Ce phénomène se retrouve dans plusieurs domaines, notamment dans la nature. Par exemple la formation des motifs fractals complexes et symétriques des flocons de neige est un motif qui émerge de l'interaction entre des molécules d'eau.

Le phénomène d'émergence est dans la continuité des recherches de Darwin sur l'évolution et la sélection naturelle. Au fil des générations, les organismes vivants complexes peuvent développer de nouvelles capacités pour s'adapter à leur environnement. En 1994, le chercheur américain Karl Sims démontre dans une simulation informatique les idées de Charles Darwin. Il développe un programme intitulé *Evolved Virtual Creatures*, mettant en scène des créatures virtuelles qui évoluent dans un environnement physique en trois dimensions, pour répondre à des tâches spécifiques comme parcourir une certaine distance en nageant, en courant ou en sautant. Ces créatures se créent de manière autonome, elles sont constituées de plusieurs blocs, reliés par des joints qui leur permettent de se plier ou de se tordre (fig 12). À chaque itération, la créature essaie d'atteindre son objectif. Elle mesure ses résultats grâce à ses capteurs et les traite dans son réseau de neurones pour changer quelques paramètres dans sa constitution, elle effectue des mutations puis réessaie jusqu'à atteindre son objectif. Les créatures étant parvenues à remplir leur tâche transmettent leurs gènes à leur descendance, donnant vie à une nouvelle population qui sera à nouveau testée et qui essaiera de surpasser ses parents. Les stratégies adoptées par les créatures sont parfois surprenantes ou très complexes. Pour nager, certaines créatures utilisent des palmes pour se propulser, d'autres se déplacent avec des mouvements sinusoïdaux et gesticulent comme des vers de terre. D'autres créatures ont pu être observées en train de contourner les règles ou exploitant des failles du programme informatique pour parvenir à leurs fins.



(fig 12) Créatures simulées dans le programme *Evolved Virtual Creatures*.

La force de cette simulation réside dans le fait que l'ordinateur propose des solutions que l'être humain n'aurait peut-être jamais pu imaginer. C'est un système qui génère de manière autonome des créatures virtuelles sans aide extérieure. À l'aide de graphiques et de nœuds, le programme génère un langage génétique qui rend les possibilités de mutations presque infinies. Ces méthodes proposent un

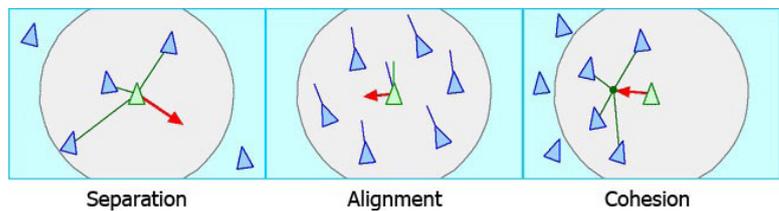
chemin vers la création de comportement intelligent et seront à nouveau utilisées dans de puissants outils de génération procédurale dédiés à la création de formes complexes ou à l'animation numérique.

Un autre phénomène d'émergence, le *flocking*¹, a souvent été observé et simulé par des développeurs. Le *flocking* désigne le comportement de groupe d'animaux, comme le mouvement des bancs de poissons ou les nuées d'oiseaux (fig 13) et d'insectes. Ce comportement permet à certaines espèces faibles individuellement, de survivre en groupe face aux menaces et de coopérer pour chasser plus efficacement. En 1987, Craig Reynolds a observé et filmé des nuées d'oiseaux, pour simuler numériquement ce phénomène de flocking dans un programme informatique nommé *Boids*. Son modèle obéit à seulement trois règles basiques (fig 14), qui reprennent les comportements des oiseaux :

- **Séparation** : éviter les zones voisines déjà trop encombrées (répulsion à courte distance).
- **Alignement** : s'orienter dans la direction moyenne de ses voisins.
- **Cohésion** : s'orienter vers la position moyenne de ses voisins (attraction à longue distance).



(fig 13) Nuée d'oiseaux en mouvement, qui illustre le phénomène du flocking.



(fig 14) Les trois règles du modèle de Boids, développé par Craig Reynolds en 1987.

Avec ces trois règles simples, la nuée de points simulés se déplace de manière complexe et réaliste, à l'image des nuées d'oiseaux. Cette simulation du *flocking* a pu trouver bon nombre d'applications, notamment dans l'étude du comportement des foules pour le design d'espace et de la sécurité, mais aussi dans la simulation de foule numérique dans l'industrie du cinéma. C'est dans le film *Batman Returns*, de *Tim Burton* en 1992, que l'on trouve pour la première fois l'usage du modèle de *Boids* pour simuler le vol d'une nuée de chauves souris.

1 Flocking peut se traduire en français par le mot agrégation, qui désigne un tout formé de parties homogènes dans un espace restreint.

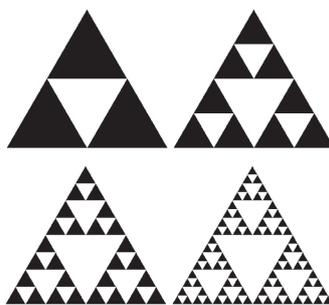
II.2 Les effets inspirés du vivant dans les outils de création numérique

Dans l'industrie de la création numérique, certains effets ou outils ont été créés suite à l'observation du vivant. Les ordinateurs ont rendu possible la simulation d'idées ou de fonctions complexes que l'homme n'avait jamais pu résoudre auparavant. L'un des exemples les plus connus est celui du *fractal de Mandelbrot*. On appelle "*figure fractale*" un objet géométrique qui présente une structure similaire à toutes les échelles. Lorsque l'on agrandit une partie d'une figure fractale, on peut retrouver l'ensemble de toute la figure, on dit alors qu'elle est *auto similaire*. Ce principe est omniprésent dans la nature, on le retrouve dans la forme des choux romanesco (fig 15), dans les feuilles des fougères, la forme des coraux ou même dans les vaisseaux sanguins. Les structures fractales se retrouvent également à plus grande échelle, dans les vagues, les montagnes, les lignes de côtes ou dans les nuages. Plusieurs objets géométriques connus sont basés sur une structure fractale, on peut notamment citer le triangle de *Sierpiński* (fig 16), ou le flocon de *Koch*. On attribue la découverte du fractale à *Benoit Mandelbrot*, un mathématicien fasciné par les applications mathématiques dans le monde réel. En 1975, il reprend des modèles mathématiques de *Gaston Julia* qui avaient pour principe d'appliquer à un nombre une équation et itérer en boucle cette équation pour former des suites de nombres. Grâce à la puissance de calcul des ordinateurs, Mandelbrot a l'occasion de tester plusieurs équations avec des nombres complexes², de les itérer en boucle puis de les représenter visuellement sur une grille à deux dimensions. Il découvre alors une équation très simple qui lorsqu'elle est itérée, dessine des formes infinies dans un espace borné. L'équation $[z = z^2 + c]$ qu'on appelle maintenant "*Ensemble de Mandelbrot*" (fig 17) dessine un motif fractal étonnant, infiniment complexe avec beaucoup de détails, qui se base sur des principes et une équation très simple. Cette figure est l'emblème des formes fractales, certains la surnomment même "*l'empreinte de dieu*" du fait de son immensité et de sa richesse.

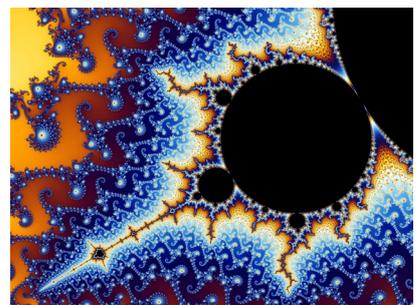
2 Un nombre complexe est composé d'un nombre réel et un nombre imaginaire.
Exemple : $a + ib$, où a et b sont des nombres réels.



(fig 15) Figure fractale dans un chou romanesco.



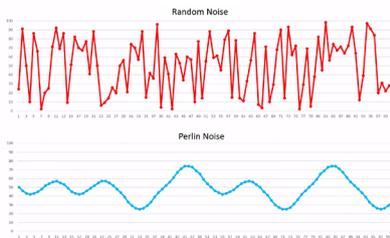
(fig 16) Figure fractale du triangle de Sierpiński.



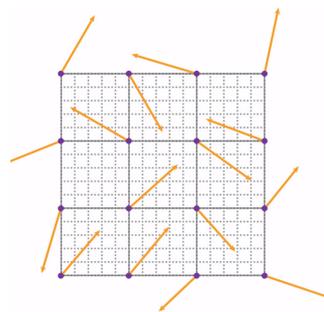
(fig 17) Représentation visuelle de l'ensemble de Mandelbrot.

Le bruit fractal

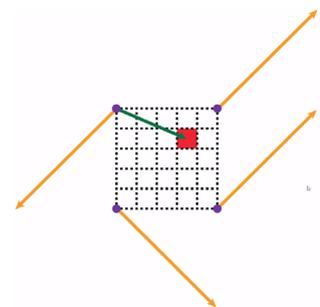
La découverte des structures fractales et de leurs motifs qui se répètent indéfiniment a été fondamentale pour les logiciels de création numérique. Par exemple, dans le logiciel de composition et d'animation graphique *Adobe After Effects*, l'effet "*bruit fractal*" est sans doute l'un des effets les plus polyvalents et l'un des plus utilisés. Sous le terme de bruit fractal, se cache en réalité un "*bruit de Perlin*" : une texture procédurale qui forme un motif fractal qui se répète à plusieurs échelles différentes. Le *bruit de Perlin* se classe dans la famille des *bruits de gradient* (par opposition aux *bruits de valeur*), c'est à dire qu'il crée un réseau de *gradient*³ pseudo-aléatoires, dont les produits scalaires sont ensuite interpolés pour obtenir des valeurs qui seront lissées. Contrairement à un bruit aléatoire qui place des points aléatoirement entre une échelle de 0 et 100, les points du bruit de Perlin sont aléatoires mais ils interagissent entre eux pour avoir des valeurs lissées (fig 18).



(fig 18) Différence entre un bruit aléatoire et un bruit de Perlin.



(fig 19) Construction de la grille et de ses vecteurs de gradient.



(fig 20) Calcul d'un des quatre produits scalaires d'un pixel.

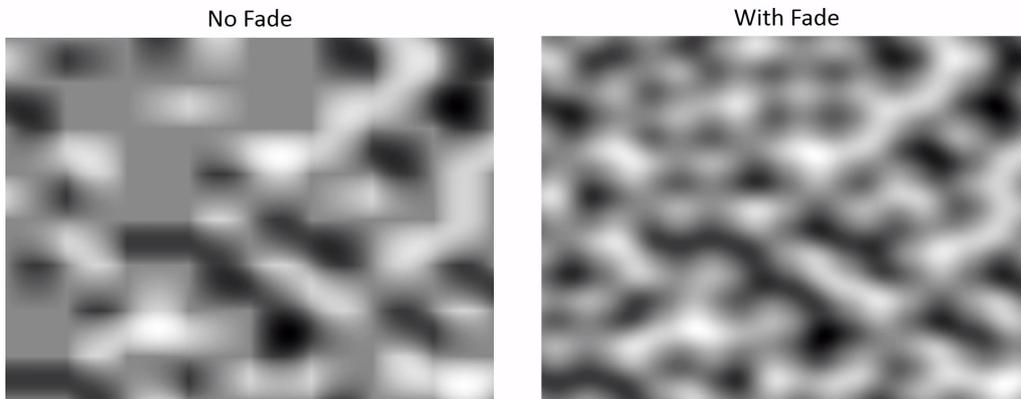
La construction du bruit de Perlin se déroule en trois étapes :

- **Définition de la grille** : on construit d'abord une grille de carrés. Chaque coin de chaque carré comporte un vecteur d'une direction aléatoire, parmi quatre directions possibles. Plus on augmente le nombre de carrés, plus on augmentera le niveau de détail du bruit (fig 19).
- **Calcul des produits scalaires** : chaque point de la grille comporte quatre vecteurs de distances dans son carré. L'ordinateur calcule les quatre produits scalaires de chaque point de la grille (fig 20).

3 Le gradient en un point est un vecteur qui caractérise la variabilité au voisinage de ce point.

- **Interpolation** : ensuite, l'ordinateur calcule l'interpolation de ces quatre produits scalaires pour avoir la valeur finale du pixel. On utilise une interpolation lissée (et non linéaire) pour avoir un résultat harmonieux (**fig 21**).

Fade function seamlessly joins all rectangles

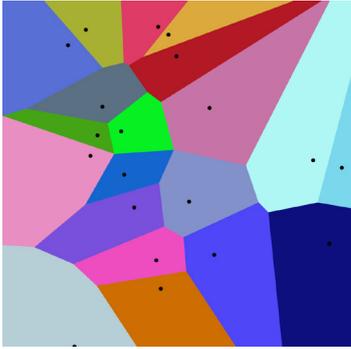


(fig 21) Interpolation des pixels sans lissage (à gauche) et avec lissage (à droite).

Le bruit de Perlin est souvent utilisé dans *After Effects* pour créer numériquement des textures et des formes naturelles réalistes et complexes, comme des nuages, de la fumée ou du feu. Il est possible de générer un bruit de Perlin sur plusieurs dimensions. Si le logiciel *After Effects* ne l'utilise que sur deux, on retrouve ce bruit sur trois dimensions dans tous les logiciels de modélisation 3D. La méthode reste la même, mais les applications sont encore plus variées : on utilise les bruits de Perlin pour générer des terrains, des montagnes, de l'eau ou des textures réalistes. Ce bruit a l'avantage d'être très économique en terme d'espace mémoire, c'est pourquoi il est tant utilisé dans l'industrie de la création numérique.

Le diagramme de Voronoï

En mathématiques, un diagramme de Voronoï (**fig 22**) est un découpage d'un plan en plusieurs *cellules*, à partir d'un ensemble de points appelé *seed*. Le tout forme un motif organique qui ressemble à une sorte de puzzle. On retrouve le motif de Voronoï dans le vivant, notamment sur le pelage des girafes (**fig 23**), sur la carapace des tortues, dans les ailes des libellules ou le craquèlement de la boue qui sèche.

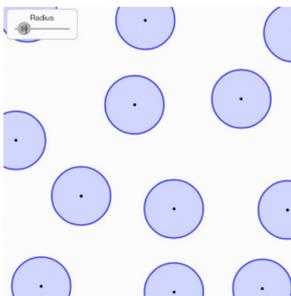


(fig 22) Découpe d'un plan à l'aide du diagramme de Voronoï.

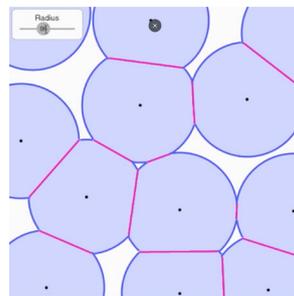


(fig 23) Motif de Voronoï sur le pelage d'une girafe.

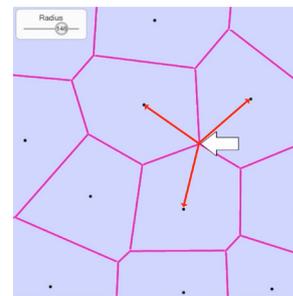
Pour recréer un diagramme de Voronoï numériquement, il faut commencer par placer des points, des *seeds*, aléatoirement sur un plan. Ensuite, chaque point fait grandir un cercle autour de lui (**fig 25**). Lorsque deux cercles rentrent en collision, ils forment une ligne comme quand deux bulles de savon se rencontrent (**fig 26**). Ainsi, chaque point génère autour de lui une cellule qui représente sa zone d'influence. On peut noter deux caractéristiques spécifiques au diagramme de Voronoï : la frontière de deux cellules est toujours à équidistance de ses deux points les plus proches, et lorsque trois frontières de cellules se rencontrent, elles forment un vertex qui est à équidistance des trois points les plus proches (**fig 27**). À l'aide d'un logiciel de modélisation et de génération procédurale, il est possible de recréer un motif de Voronoï sur un volume en 3D. Pour appliquer et illustrer cette méthode, j'ai réalisé un diagramme de Voronoï sur un disque (**fig 28**), avec le logiciel de génération procédurale *Houdini*.



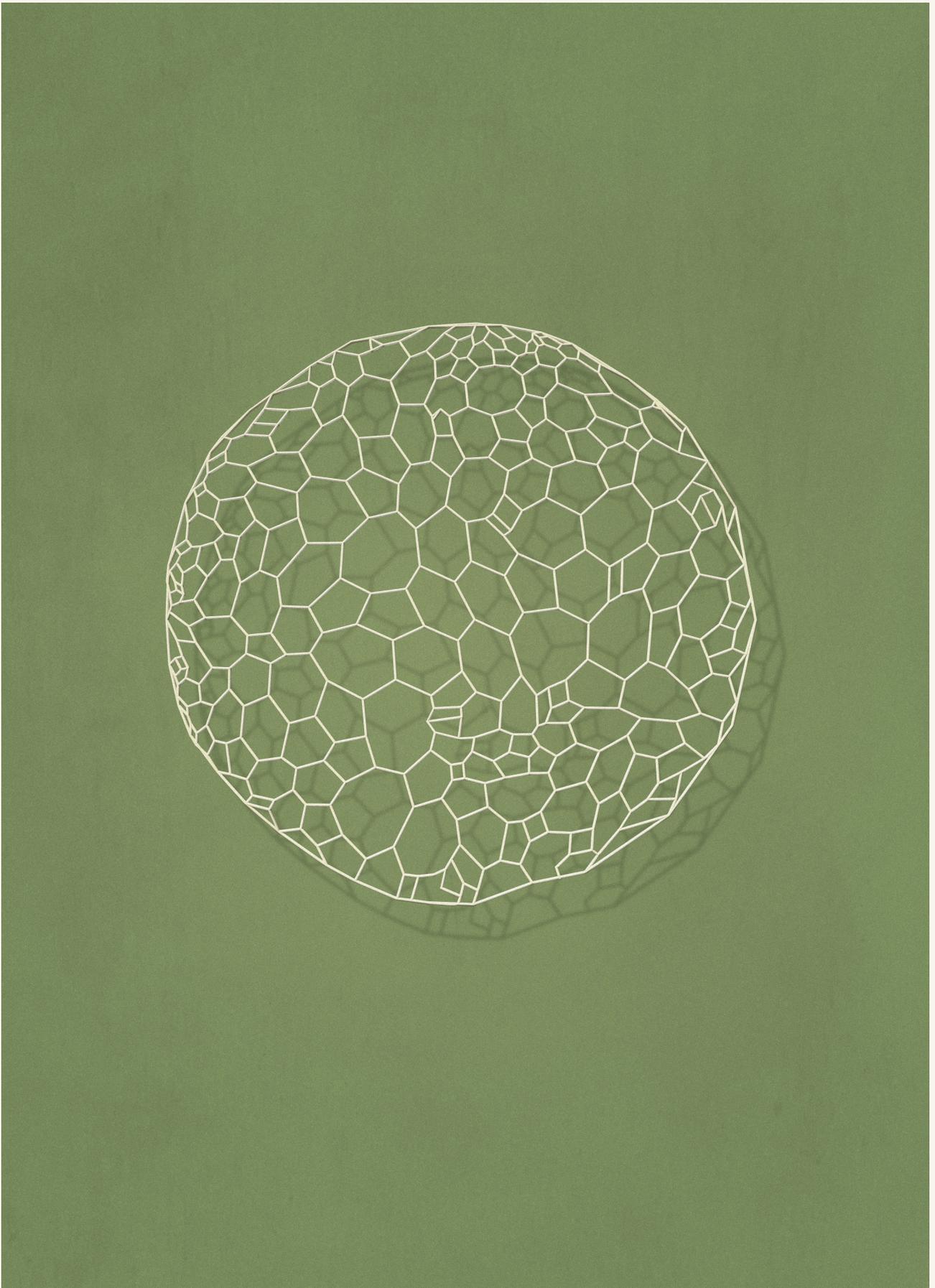
(fig 25) Des points génèrent autour d'eux des cercles qui grandissent.



(fig 26) Lorsque deux cercles se rencontrent, ils forment une ligne.

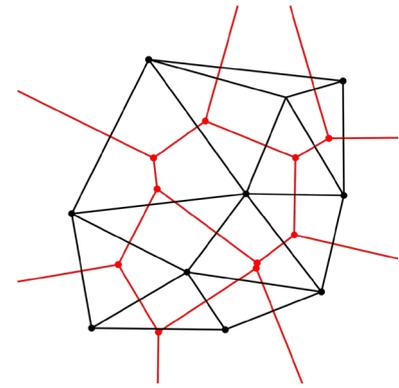


(fig 27) Un vertex est à équidistance des trois points les plus proches.



(fig 28) Modélisation 3D du diagramme de Voronoï avec le logiciel Houdini.

Les applications du diagramme de Voronoï sont nombreuses, notamment dans les logiciels de modélisation 3D. Par exemple, le logiciel Cinema4D propose un outil nommé “*Voronoi fracture*” qui permet de fragmenter un volume en plusieurs morceaux à partir d’un *seeding* (un ensemble de points répartis aléatoirement). Cet outil permet de fracturer facilement des objets de manière réaliste ; il est utilisé dans les effets spéciaux pour des explosions de mur ou de route par exemple. Le diagramme de Voronoï est complémentaire à la *triangulation de Delaunay*, une méthode qui maximise le plus petit angle de l’ensemble des angles des triangles, évitant ainsi les triangles “allongés”. Utilisées ensemble (fig 29), ces deux méthodes permettent d’optimiser les polygones d’un volume 3D en calculant la répartition des polygones pour qu’elle soit la plus efficace possible. Dans d’autres domaines, le diagramme de Voronoï trouve plusieurs applications, notamment en cartographie. Par exemple, ce principe est utilisé pour calculer les zones d’influences des hôpitaux⁴, puis anticiper les trajectoires les plus courtes et ainsi amener un patient à l’hôpital le plus proche selon la région dans laquelle il se trouve.



(fig 29) Superposition d’un diagramme de Voronoï (en rouge) et de sa triangulation de Delaunay (en noir).

Diffusion Limited Aggregation

Le processus de *DLA* (*Diffusion Limited Aggregation*), est un processus de marche aléatoire qui finit par former un amas, une agrégation de particules. Durant ce processus, des particules en mouvement se déplacent de manière aléatoire ; on appelle ce procédé *mouvement Brownien*, en référence à Robert Brown, un botaniste qui a découvert ce phénomène en 1827 lors de ses recherches sur le pollen d’une fleur. Cette découverte a joué un rôle dans la démonstration de l’existence d’atomes et de molécules, ou dans la description des phénomènes issus de la thermodynamique⁵. Le processus de *Diffusion Limited Aggregation* forme des motifs fractals, qu’on peut retrouver dans la formation de coraux, de givre (fig 30) ou les réseaux de drainage des rivières (fig 31). La figure de *Lichtenberg* (fig 32) est également une forme connue résultante du processus de DLA, qui se forme lors de décharges électrostatiques. On retrouve notamment cette figure sur la peau des personnes foudroyées.

4 Tran. K. (2020) How to Find the Nearest Hospital with a Voronoi Diagram

5 La thermodynamique est une branche de la physique qui traite des phénomènes d’échanges thermiques et d’énergie.



(fig 30) Formation de givre sur du verre.

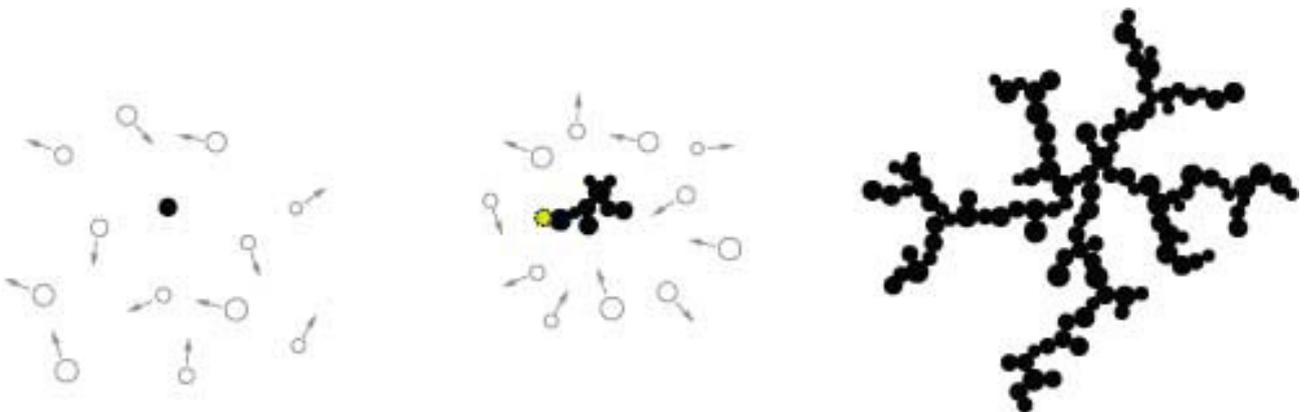


(fig 31) Réseau de drainage du fleuve Brahmapoutre, au Tibet.



(fig 32) Figure de Lichtenberg, sur une plaque d'acrylique.

Pour simuler numériquement le processus de *Diffusion Limited Aggregation*, il faut commencer par générer un *seed point* : un point statique sur un plan. On ajoute à proximité un point en mouvement se déplaçant à chaque étape dans une direction aléatoire. Avant chaque déplacement, le point en mouvement vérifie si il n'y a pas un point statique à proximité. Si il n'y en a pas, il se déplace dans une nouvelle direction aléatoire. Au bout d'un moment, le point en mouvement va finir par rencontrer un point statique et s'y accrocher ; à ce moment, il devient à son tour un point statique et un nouveau point en mouvement apparaît un peu plus loin. Au fur et à mesure que les points en mouvement s'accrochent, cela crée un amas de particules de forme fractale (fig 33). Pour illustrer cette méthode, j'ai généré une forme issue du processus de DLA (fig 34), avec le logiciel Houdini. Cet algorithme peut être lent et prendre beaucoup de temps à calculer car il simule beaucoup de déplacements de points aléatoires. Pour accélérer ce processus, on peut créer une zone réduite qui limitera l'amplitude des points en mouvement, ou on peut augmenter le nombre de points en mouvement pour favoriser les rencontres avec les points statiques.



(fig 33) Les points en mouvements s'accrochent aux points statiques, pour former un amas de particules.

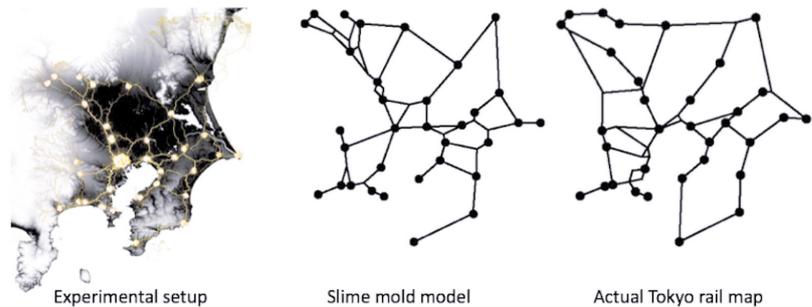


(fig 34) Modélisation 3D du processus de Diffusion Limited Aggregation, avec le logiciel Houdini.

Le processus de DLA peut être utilisé dans l'industrie de la création numérique en 2D ou en 3D pour recréer des formes que l'on retrouve dans la nature, telles que le givre, les éclairs, les vaisseaux sanguins, les coraux ou des éléments végétaux comme des racines par exemple. On trouve des applications dans d'autres domaines, en particulier la cartographie, où le processus de *Diffusion Limited Aggregation* permet de mieux comprendre le monde qui nous entoure, comme le montre une étude Chinoise⁶ où est utilisée cette méthode pour comprendre et anticiper la formation et l'évolution des réseaux des rivières du bassin de *Northwest China Basin*. Les motifs que forme le processus de DLA présentent des similarités avec un organisme qui fascine les chercheurs depuis quelques années, le *Physarum polycephalum*, surnommé "le Blob" (fig 35). Longtemps considéré à tort comme un champignon, cet organisme appartient en fait au règne *protiste* (organisme eucaryote, composé d'une seule cellule), qui se développe dans les zones d'ombre et humide, en particulier dans les forêts. Le blob est particulièrement intrigant car il se développe très rapidement et présente des formes d'intelligence et de mémoire dans le choix de ses mouvements, sans être doté de cerveau. Les chercheurs s'intéressent à son réseau de déplacements car le blob trouve toujours les chemins les plus optimisés pour trouver sa nourriture en cherchant les chemins les plus courts. Des expériences⁷ ont permis au blob de repenser des réseaux de transport, comme le plan de métro de Tokyo (fig 36) ou les routes de France, afin de les optimiser et les améliorer sur les plans économique et écologique.



(fig 35) *Physarum polycephalum* qui se développe sur un tronc.



(fig 36) Expérience (à gauche) qui compare le réseau du blob (au milieu) avec celui des trains de Tokyo (à droite).

6 Wang, S, Ji, H, Li, H, Zhan, Y. (2020). Growth diffusion-limited aggregation for basin fractal river network evolution model

7 Tero, A, Takagi, S, Saigusa, T, Ito, K, Bebbber, P (2010). Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design

Réaction-Diffusion

Le système de réaction-diffusion est un modèle mathématique qui décrit l'évolution de la concentration de deux substances dans un espace. Ce système est soumis à deux processus : le processus de réaction où les substances se transforment et interagissent entre elles, puis le processus de diffusion qui répartit les substances dans l'espace. Ce système de réaction-diffusion se retrouve dans les domaines de la chimie, la biologie ou la physique ; on peut le retrouver sous plusieurs formes et motifs remarquables dans la morphogenèse⁸, comme le pelage des zèbres (fig 37) ou le motif des empreintes digitales (fig 38). Ces motifs qu'on appelle communément les *structures de Turing*, ont été découverts grâce aux recherches du mathématicien anglais Alan Turing, sur les mécanismes de la morphogenèse. Il cherchait à comprendre pourquoi le pelage de certains animaux comportait des points ou des lignes, qui se formaient de manière homogène et autonome. On retrouve ces motifs de réaction-diffusion dans beaucoup de domaines, ce qui fait de ce système l'un des plus populaires aujourd'hui.



(fig 37) Motif du pelage d'un zèbre.



(fig 38) Motif d'une empreinte de doigt humain.

Pour simuler numériquement le système de réaction-diffusion, il faut d'abord créer un espace où l'on retrouve deux substances distinctes : la substance A et la substance B. Ces deux substances sont ajoutées dans l'espace en fonction de deux variables : la variable f (pour *feed*) pour la substance A et la variable k (pour *kill*) pour la substance B. Elles respectent deux règles dans cet espace :

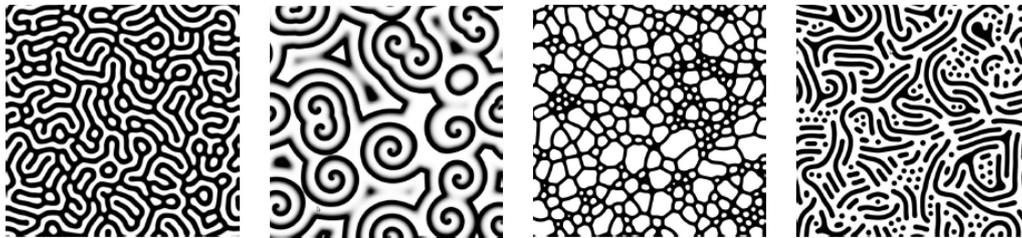
- **Réaction** : lorsqu'une unité de substance A rencontre deux unités de la substance B, l'unité A se transforme en B. Cela donne la formule suivante : $A + 2B \Rightarrow 3B$.

- **Diffusion** : la substance A et la substance B se diffusent partout dans la grille, selon deux variables distinctes : D_A et D_B .

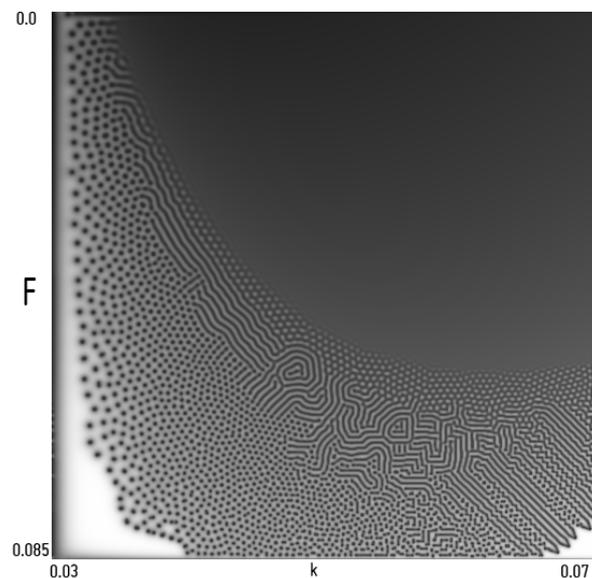
8 La morphogenèse désigne le développement de la forme et de la structure d'un organisme vivant.

La simulation progresse ensuite de manière autonome, calculant à chaque temps Δ_t la concentration des deux substances dans son espace, en fonction des variables d'entrées et des règles de réaction et de diffusion. De ce système peuvent émerger des résultats très différents (fig 39) selon les valeurs des variables f , k , D_A , D_B et Δ_t . La classification de *Karl Pearson* (fig 40), un mathématicien anglais, représente les variations du motif de réaction-diffusion lorsque la variable k (en abscisse) et la variable f (en ordonnée) varient dans une fourchette de valeurs définie. Il est également possible de simuler ce système dans un univers 3D, comme j'ai pu l'illustrer (fig 41) grâce au logiciel Houdini.

Les motifs de réaction-diffusion font figure d'inspiration pour les artistes et designers d'aujourd'hui. Les patterns de Turing offrent une grande variété de formes et de textures organiques, avec un fort contraste, ce qui les rend particulièrement attirants pour l'œil humain. Les domaines de l'architecture et du textile trouvent dans le système de réaction-diffusion plusieurs applications intéressantes en exploitant ses propriétés structurales. Par exemple, en 2016 la marque



(fig 39) Différents motifs émergeant du système de réaction-diffusion.



(fig 40) Classification de Karl Pearson du système de réaction-diffusion.

de sport *New Balance* a conçue aux cotés du studio de design génératif *Nervous System*, des semelles de chaussures de running (fig 42) qui s'adaptent au pied du coureur. En récoltant des données issues des courses de quelques joggeurs, ils ont analysé les points de pression que subit la semelle, pour former une structure qui s'adapte selon le profil et la morphologie du client. Grâce à un programme génératif, la structure de la semelle pouvait s'adapter aux datas et créer une chaussure unique, en utilisant des processus inspirés de la nature. Coup de génie ou simple coup marketing ? Difficile à dire, mais *New Balance* semble apprécier cette approche du design inspiré du vivant, comme le prouve leur nouvelle collection de chaussures de sport sortie tout récemment (fig 43), où l'on retrouve à nouveau des motifs de réaction-diffusion.

Les outils de génération procédurale semblent fonctionner de pair avec les motifs que l'on retrouve dans la nature. Avec l'émergence des nouvelles technologies, une nouvelle ère du design se profile devant nous, avec de nouvelles possibilités mais aussi de nouveaux défis à relever.



(fig 42) Semelles générées de manière procédurale, en 2016.



(fig 43) Motif de réaction-diffusion sur un modèle de chaussure, en 2020.



(fig 41) Modélisation 3D du processus de Réaction-Diffusion, avec le logiciel Houdini.

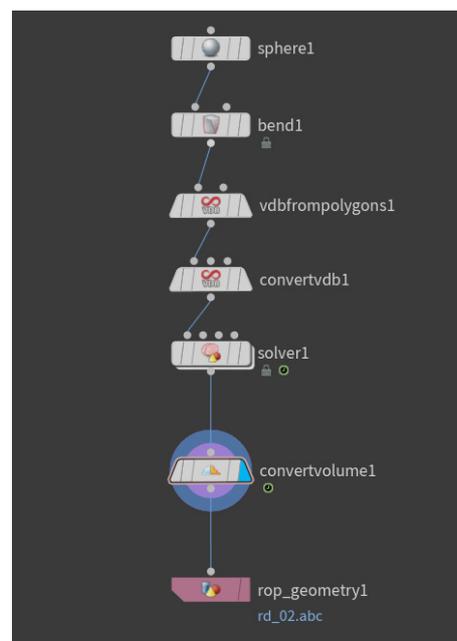
II. 3 Houdini et la génération procédurale

Depuis quelques années, la notion de génération procédurale fleurit un peu partout dans les domaines du jeu-vidéo et du cinéma puis un peu plus tard dans le motion design. La génération procédurale consiste à créer du contenu numérique de manière automatisée en répondant à un ensemble de règles définies par un algorithme. On peut générer ainsi des images, des niveaux dans les jeux-vidéos ou encore de la musique.

Développé à Toronto par l'entreprise *SideFX*, *Houdini* est un logiciel de modélisation 3D, spécialisé dans la génération procédurale. Il couvre plusieurs domaines de la production 3D : la modélisation, l'animation, les particules, les dynamiques, la volumétrie (simulation de nuage ou de fumée) et même le rendu. L'interface se présente sous une forme nodale, c'est à dire que pour créer un algorithme, on utilise différents opérateurs que l'on connecte les uns avec les autres. Il existe de nombreux opérateurs différents, qui ont des fonctions propres et des paramètres que l'on peut définir et ajuster selon le besoin. On connecte plusieurs opérateurs ensemble pour former un réseau de nœuds, où circule l'information du haut vers le bas (fig 44). La structure nodale permet à l'utilisateur de modéliser des objets complexes en gardant totalement le contrôle sur sa construction, car chaque nœud peut être modifié à tout moment. Ainsi, Houdini peut être considéré comme une boîte à outils de programmation visuelle facilement modulable, qui rend la programmation plus accessible aux artistes.

La méthode procédurale peut présenter des points communs avec les mécanismes étudiés précédemment, comme la sélection naturelle ou le phénomène d'émergence. Effectivement, Houdini donne la possibilité de créer de manière itérative, ce qui permet de tester plusieurs paramètres avant de choisir la modélisation finale, en ajoutant si l'on souhaite des notions d'aléatoire et de chaos. En construisant des réseaux complexes à partir d'opérateurs simples, nous pouvons observer l'émergence de nouvelles idées créatives, comme a pu le faire Karl Sims avec sa simulation *Evolved Virtual Creatures* (fig 12).

Dans le milieu de la création numérique, en particulier dans le motion design, Houdini attire de plus en plus les artistes et les designers. Malgré sa réputation de logiciel difficile à maîtriser, certains artistes que l'on surnomme parfois



(fig 44) Interface nodale du logiciel Houdini.

“*Houdini wizards*” arrivent à dompter ce logiciel pour générer des visuels complexes et organiques, qui ne pourraient pas exister sans le principe de génération procédurale. Certains motion designers ont popularisé ce logiciel dans le motion design, on peut citer par exemple le suédois Simon Holmedal, qui a créé aux côtés du studio *Man vs. Machine*, des visuels inédits dans l’industrie du motion design (fig 45), grâce au logiciel Houdini.



(fig 45) Stillframe issue du projet Logitech Powerplay, Man vs. Machine, Simon Holmedal.



(fig 45) Stillframe issue du projet Air max ‘17, Man vs. Machine, Simon Holmedal.

Étude de cas - Expérience professionnelle

Je travaille actuellement dans le studio de création *Cutback*, spécialisé dans les visuels de concerts et les expériences scénographiques. Aujourd’hui, le logiciel Houdini n’est pas intégré dans notre méthodologie de travail, pourtant cet outil pourrait beaucoup nous apporter.

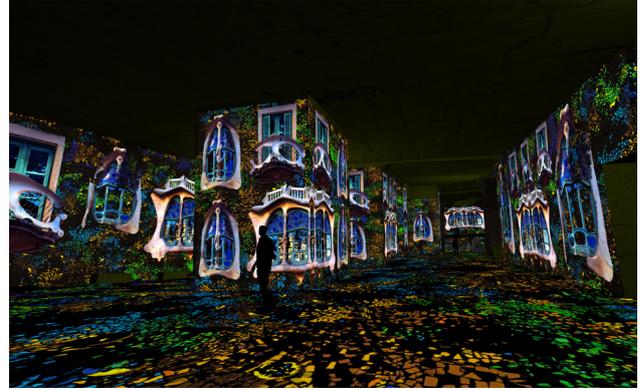
Depuis environ un an, *Cutback* travaille au côté de la société *Culturespaces* qui organise des expositions immersives partout dans le monde. Nous réalisons des expositions animées de grands artistes tel que Yves Klein, Paul Klee (fig 47) ou encore Antoni Gaudí (fig 48). Une grosse partie de l’animation des œuvres utilise le principe de *reveal* ; on crée une texture en noir et blanc qui sert de masque, où les pixels noirs cachent l’œuvre et les pixels blancs la révèlent. On part donc d’une texture toute noire et nous générons des pixels blancs de différentes manières pour dévoiler l’œuvre en respectant ses propriétés. Il faut notamment faire attention à la technique que le peintre utilise, pour respecter la forme et la direction de ses coups de pinceau, ainsi que la composition générale du tableau.

Le problème de ces *reveals* réside dans le fait qu’il faut faire apparaître des centaines d’œuvres différentes dans une seule exposition et que les outils que nous utilisons sont trop restreints pour générer des textures vraiment différentes. Effectivement, nous utilisons fréquemment les mêmes techniques pour générer les textures et les expositions peuvent paraître répétitives. Par exemple, les effets de *bruit fractal* et de *turbulence* dans le logiciel After Effects sont utilisés dans de nombreuses expositions que nous avons réalisées. Même si ces effets fonc-

tionnent et que le résultat est satisfaisant, nous devons procéder autrement car Culturespaces prend beaucoup d'ampleur, et de nombreuses nouvelles expositions nous attendent.



(fig 47) Exposition de Paul Klee, aux Bassins des lumières, Bordeaux.



(fig 48) Exposition d'Antoni Gaudí aux Carrières de lumières, Baux-de-Provence.

Pour varier les effets de *reveal*, nous avons commencé à utiliser le logiciel Cinema4D pour générer des textures grâce aux outils de MoGraph. Ces outils permettent de mettre des objets en mouvement de manière harmonieuse, idéal pour créer des textures de transition. Ces outils permettent une plus grande variété dans la création des *reveals*, mais il est très chronophage de générer plusieurs itérations d'un même résultat. La dimension procédurale d'Houdini pourrait permettre de constituer une grande base de données de *reveals* complexes et organiques, en ayant la possibilité d'itérer chaque *reveal* très facilement. Le champs des possibles qu'offre Houdini est beaucoup plus large que celui de Cinema4D car ses outils sont moins bridés. La contrepartie est que le logiciel est moins intuitif, la création d'un *reveal* peut être plus long au départ mais sur le long terme nous serions gagnants. Après en avoir parlé avec les directeurs créatifs de Cutback, il est possible que Houdini rentre progressivement dans la méthodologie de Cutback dans le futur.

III. S'inspirer du vivant pour imaginer le monde demain

III.1 Le biomimétisme

Depuis son apparition il y a environ 4 milliards d'années, la vie sur Terre s'est considérablement complexifiée, de la première molécule jusqu'à la grande diversité d'organismes que l'on connaît aujourd'hui. La biodiversité actuelle montre la capacité qu'a le vivant à prospérer et à s'adapter à tous les changements de son environnement. Riche de l'évolution d'au moins 10 millions d'espèces différentes, la biodiversité peut être perçue comme un immense laboratoire de recherche et de développement en terme d'adaptation et de durabilité. Mais aujourd'hui, cette biodiversité est menacée car elle confrontée à de nouveaux problèmes majeurs.

Les défis qui se posent à nous aujourd'hui sont les résultats du mode de vie effréné de notre mode de vie occidental : l'industrialisation de masse, l'agriculture intensive, les transports individuels, l'urbanisation croissante ou la croissance démographique, pour ne citer qu'eux. Notre civilisation et notre mode de vie est en train de détruire la biodiversité, tout en déséquilibrant le climat à une vitesse folle, menaçant ainsi notre propre espèce et toutes celles qui nous entourent.

Face à l'urgence de la situation et à ces problèmes majeurs, nous avons besoin de changer radicalement notre rapport à la nature, en la prenant comme référence pour repenser notre mode de vie. C'est dans ce sens que s'inscrit le *biomimétisme*⁹, une approche qui consiste à s'inspirer du vivant pour innover de façon durable. Il s'agit pourtant d'une démarche ancienne, comme nous l'avons vu par exemple avec les machines volantes de *Leonard de Vinci*, inspirées des mouvements d'ailes des oiseaux. C'est dans les années 1990 que cette approche revient sur le devant de la scène, grâce à la scientifique *Janine Benyus* qui propose d'ajouter au biomimétisme les notions d'écologie et de durabilité. Elle souhaite que cette approche ne se limite pas qu'à des exemples d'innovations technologiques comme le fameux exemple du scratch Velcro, inspiré du fruit de la bardane,

9 Du grec *bíos* (vie) et *mímêsis* (imitation).

mais qu'elle englobe une vision systémique. Janine Benyus énonce alors les principes de fonctionnement du vivant, observés à l'échelle de tous les écosystèmes :

- La nature fonctionne avec des échanges cycliques de matière et d'énergie, chaque déchet produit par une espèce va être recyclé comme matière première par une autre.
- La nature optimise l'utilisation de ressources et de moyens, elle est efficace et évite les pertes et les gaspillages.
- La nature se focalise sur les interactions locales, y compris pour l'approvisionnement.
- La nature utilise majoritairement des énergies de flux (comme l'énergie solaire) et très peu d'énergies de ressources (comme les énergies fossiles).
- La nature repose sur des équilibres dynamiques où tous les éléments d'un écosystème sont multifonctionnels et interagissent ensemble de manière interconnectée.
- La nature innove se transforme en permanence au service de la résilience et de la diversité. Elle utilise les contraintes comme des opportunités pour évoluer.

Ces principes peuvent être compatibles à tous les niveaux de notre mode de vie et de notre façon de créer. Chaque domaine peut trouver des applications concrètes dans l'approche biomimétique, y compris la création numérique, comme nous l'avons vu avec les logiciels de génération procédurale qui semblent s'accorder au moins au principe d'itération et de résilience, énoncé par Janine Benyus. Ces outils de génération procédurale joueront un rôle majeur dans la 4ème révolution industrielle dans laquelle nous commençons à entrer, dirigée en particulier par de nouvelles méthodes de fabrication.

Effectivement, depuis l'ère industrielle, nous utilisons des matériaux à usage unique, qui laissent des traces sur notre planète. Les usines de fabrication sont spécifiques à certains matériaux, qu'elles exportent à travers tout le globe en laissant une empreinte carbone indécente. Les chaînes de montages ont induit une approche du design où chaque matériau est associé à une fonction, à un usage unique. Nous arrivons à une nouvelle ère où nous pouvons concevoir autrement, notamment grâce à l'avancée technologique des imprimantes 3D. D'abord utilisée dans la phase de prototypage uniquement, l'impression 3D se développe désormais dans les phases de production en utilisant un large choix de matériaux : du métal, du verre ou même du tissu humain. Cela va changer beaucoup de choses car la force de production et d'assemblage que nous avons déportée notamment dans les pays d'Asie sera relocalisée réduisant ainsi l'empreinte carbone émise par les transports. Cette idée rejoint le principe de la nature qui se focalise sur les interactions locales.

Combinées avec les progrès de l'intelligence artificielle et du *machine learning*¹⁰, nous pouvons aussi concevoir des structures plus efficaces et économiques, en utilisant une approche de design itératif afin de fabriquer les solutions les plus viables. La notion de durabilité est aussi au cœur du sujet de la fabrication, comme le montre les avancées de la NASA, avec le *Refabricator* : une imprimante 3D capable de fabriquer et de recycler à partir d'un seul et même matériau. Cette imprimante est aujourd'hui installée sur la station spatiale internationale (ISS) et sert à fabriquer des outils qui peuvent être recyclés lorsqu'ils ne sont plus nécessaires, avec un des principes du biomimétisme qui reprend l'idée des échanges cycliques de la matière. Le but de la NASA est de prendre son indépendance dans la fabrication, pour gagner en durabilité et en autonomie. Cette technologie aura également un rôle à jouer dans la conquête spatiale et aidera, par exemple, l'Homme à aller sur Mars.

La nature regorge d'organismes constitués de matériaux complexes et économes. Effectivement, on constate que 96% de la matière vivante est composée seulement de 6 atomes, qu'on appelle les *CHNOPS* (Carbone, Hydrogène, Azote, Oxygène, Phosphore et Soufre). Ces atomes sont abondants dans l'environnement immédiat, donc facilement accessible et rapidement recyclable, ce qui assure une économie dans l'utilisation des ressources. De nombreuses innovations peuvent donc être trouvées dans la nature, dans le domaine des nouveaux matériaux. Nori Oxman, designer et chercheuse au *MIT Media Lab*¹¹, travaille sur de nouveaux matériaux bio-compatibles, qui ont pour objectif de sortir de la conception avec des matériaux à usage unique. À travers le projet *Aguahoja* (fig 49), Nori Oxman et son équipe développent une structure bio-compatible avec des matériaux uniquement naturels, comme la chitine (que l'on trouve dans la structure des crustacés) et la pectine (que l'on trouve dans les citrons). À terme, ces matériaux pourraient être une alternative au plastique, en présentant une plus forte adaptation à son environnement. Fabriqué grâce à des imprimantes 3D capables d'utiliser ces nouveaux matériaux, *Aguahoja* prend vie sous la forme



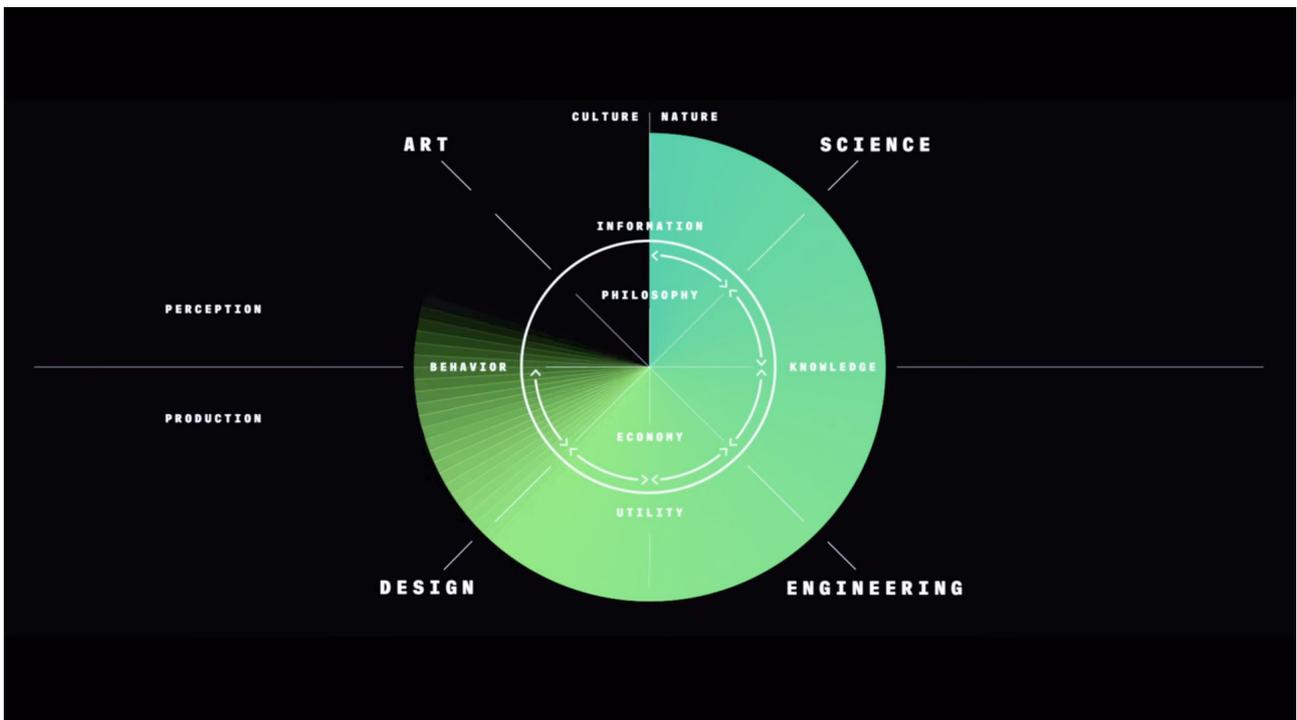
(fig 49) Le projet *Aguahoja*, conduit par Nori Oxman au MIT Media Lab .

10 Le machine learning est une méthode d'analyse de données qu'un système utilise pour identifier des tendances et prendre des décisions sans aide humaine extérieure.

11 Le MIT Media Lab est un laboratoire de recherche qui évolue au côté de l'école d'architecture du MIT (Massachusetts Institute of Technology).

élégante d'un pavillon architectural de cinq mètres de haut, exposé aujourd'hui au *Smithsonian museum* à New-York. Ce projet mélange dans un cycle (fig 50) plusieurs domaines et savoirs-faire : l'art, la science, l'ingénierie et le design, en se basant sur le principe d'interdisciplinarité qui est l'un des piliers du biomimétisme.

L'approche du MIT est d'anticiper les problèmes émergents, en inventant de nouveaux processus grâce à une approche de design itératif et en fusionnant plusieurs domaines d'expertises. En cherchant à répondre à des problèmes qui se poseront dans 20 ou 50 ans, le laboratoire prend de l'avance afin d'inspirer les générations futures.



(fig 50) L'approche cyclique d'interdisciplinarité, suivie par Nori Oxman et son équipe au MIT Media Lab.

III.2 Imaginer et anticiper le futur

L'avancée scientifique est en échange permanent avec l'univers de la science fiction où sont imaginées et anticipées les technologies de demain. L'histoire ne manque pas d'exemples où la littérature et le cinéma d'anticipation ont prédit des changements technologiques dans la société que nous pouvons observer aujourd'hui. Les auteurs et artistes ont une responsabilité par rapport à notre imaginaire collectif car ce sont eux qui sèment les premières graines des évolutions de notre société.

Ces univers de science-fiction ont souvent pris la voie d'un futur dystopique, en imaginant des sociétés où les citoyens sont sous l'emprise totale d'une force supérieure et sont ainsi privés de leurs libertés. Les œuvres dystopiques peuvent être perçues comme le reflet des préoccupations et des inquiétudes de leurs époques. Par exemple, le roman *1984* de George Orwell écrit en 1949, explore et dénonce les dérives du totalitarisme, à travers un univers liberticide qui est sous la surveillance oppressante de son gouvernement. D'autres œuvres, comme le film *Soleil Vert*, imagine une société qui souffre de la surpopulation et de l'épuisement des ressources naturelles, où les dirigeants creusent au maximum les inégalités sociales. Plus tard, des films comme *Blade Runner* ou *I, Robot* envisagent un monde où robots et machines surpassent les Hommes et se retournent contre eux. Les œuvres de science-fiction dystopiques anticipent donc des éventuelles menaces qui pourraient peser sur notre civilisation, en imaginant les dérives potentielles du mode de vie de notre époque. Les gouvernements actuels prennent ces enjeux très au sérieux, comme le prouve l'armée française en constituant sa "Red Team", une équipe de 10 auteurs de science-fiction qui auront pour rôle d'imaginer les menaces et les grands défis stratégiques sociaux et technologiques de notre futur, afin de mieux les anticiper.

Aujourd'hui, les enjeux ont évolué et nous savons que le changement climatique est l'une des menaces majeures de notre époque. Le vivant prend alors un rôle plus important dans les œuvres des artistes et des auteurs de science-fiction. Pour l'auteur Alain Damasio, le mouvement du *Cyberpunk*¹² est aujourd'hui légèrement dépassé, car les enjeux ne sont plus les mêmes qu'il y a dix ou vingt ans. On observe l'émergence de nouveaux imaginaires, mélangeant les espèces vivantes à la technologie pour former des hybridations de formes de vie plus intenses. Le genre de la science-fiction semble muter vers des formes plus organiques, en s'adaptant aux enjeux actuels et futurs de notre société.

Certains artistes sont précurseurs de cette approche d'hybridation avec le vivant. On peut prendre pour exemple la célèbre musicienne et auteure islandaise

12 Le cyberpunk est un genre de la science fiction, qui met en scène le futur proche d'une société technologiquement avancée.

Björk, qui voit en la nature et la technologie un mouvement d'espoir vers notre futur. Alors que ces deux mots semblent s'opposer aux premiers abords, Björk les explore en essayant d'exprimer la nature grâce à la technologie à travers toute son œuvre : du projet *Biophilia*, un album sous la forme d'applications qui associent différents phénomènes naturels avec des émotions humaines, à l'exposition *Björk Digital* (fig 51) qui plonge les visiteurs dans ses univers surréels en réalité virtuelle, jusqu'à *Utopia*, son dernier projet, qui met en scène un monde utopique et imaginaire où la nature s'exprime librement. Le réalisateur *Andrew Thomas Huang* a souvent accompagné les projets de Björk, pour créer ses univers virtuels futuristes et organiques. Pour lui, associer des effets spéciaux numériques avec des textures naturelles, c'est la représentation la plus honnête du monde actuel car aujourd'hui la nature vierge et sauvage n'existe plus vraiment, tant l'impact de l'Homme est omniprésent.

Cette combinaison de nature et de technologie s'est enrichie grâce au progrès du *machine learning*. Certains artistes, comme *Sofia Crespo*, utilisent cet outil pour explorer de nouvelles formes du vivants. Dans son projet *Artificial Remnants*, Sofia donne vie à de nouvelles espèces d'insectes générées par un algorithme qui leur donne une forme, une texture, un nom et une description anatomique unique. Cet algorithme se base sur des données d'insectes existants et propose ainsi un nouveau regard sur la nature qui est souvent oubliée et prise pour acquis. La méthode du *machine learning* a inspiré aussi le studio *XK*, un duo de motion designers basé à Londres, pour générer de nouvelles formes virtuelles du vivant. À travers leur projet *Strange Spring* (fig 52), Alexa Sirbu et Lukas Vojir imaginent des fleurs et des plantes aliens, générées grâce au logiciel *Houdini* et inspiré d'images de fleurs générées par intelligence artificielle. Le studio *XK* imagine des nouvelles espèces vivantes sur-réelles qui prennent vie grâce à la technologie. L'émergence de ces espèces virtuelles fait écho à celles qui disparaissent dans le monde réel et celles qui ne verront peut être jamais le jour.



(fig 51) Avatar en réalité virtuelle de Björk, pour le projet Family, dans l'exposition Björk Digital.



(fig 52) Le projet Strange Spring imagine des formes surréelles de fleurs et de plantes.

Les artistes et designers d'aujourd'hui imaginent donc le monde de demain. Une certaine tendance tend à réconcilier l'Homme avec le vivant comme le montre l'évolution de la science-fiction. La technologie n'est pas forcément opposée à la nature ; au contraire elle peut permettre de la sublimer et de nous en rapprocher plus intimement. Enfin, associés à une approche biomimétique et une approche interdisciplinaire, il appartient aux artistes et designers d'imaginer les possibilités de l'évolution de notre société, comme a pu le faire l'architecte de l'imaginaire *Luc Schuiten* à travers ses propositions de villes végétales futuristes (fig 53).



(fig 53) Le panorama de la Cité Végétale, une ville utopique imaginée par Luc Schuiten.

Conclusion

À travers ce mémoire, nous avons cherché à comprendre dans quelles mesures le vivant inspire les artistes et designers au cours du temps.

Premièrement, nous avons vu que l'Homme a souvent cherché à s'émanciper de la nature en l'observant avec supériorité ; d'abord en réduisant le vivant à une machine afin de l'étudier, puis en théorisant son évolution pour mieux l'exploiter. Mais des artistes comme Ernst Haeckel ont eu une immense fascination pour la nature et ont cherché à la reproduire et à s'en inspirer dans leurs créations. Les propriétés esthétiques de la nature, comme la symétrie ou les motifs fractals, ont souvent inspiré les artistes à travers l'histoire. On reconnaît aujourd'hui un rapport entre les formes esthétiques du vivant et le bien-être.

Ensuite, nous avons étudié la place de la nature dans la révolution numérique. Grâce à des simulations informatiques comme le *Jeu de la Vie*, nous avons découvert le phénomène d'*émergence* qui permet d'obtenir des résultats très complexes à partir de données très simples. Ce phénomène a permis de comprendre et d'étudier les comportements que l'on trouve dans le monde du vivant, pour ensuite créer des outils numériques plus complexes. À travers quatre motifs issus du vivant, comme le motif fractal ou le diagramme de Voronoi, nous avons pu comprendre comment recréer numériquement des motifs issus du monde du vivant, et quelles applications concrètes ils ont pu apporter dans le milieu de la création numérique. Nous avons pu expérimenter le logiciel de génération procédurale Houdini, qui permet de créer de façon procédurale et obtenir ainsi l'émergence de résultats variés et complexes grâce à un système nodale, facilement modifiable.

Enfin, nous avons cherché des approches différentes pour imaginer le monde de demain, en prenant en compte les enjeux climatiques de notre planète. L'approche biomimétique propose de placer la nature comme modèle pour diriger notre façon de créer et notre mode de vie vers une direction plus durable. La chercheuse Janine Benyus évoque six principes que suit la nature dont nous pouvons nous inspirer pour suivre cette direction. Les avancés technologiques vont dans ce sens, notamment la révolution industrielle de l'impression 3D accompagnée de ses nouveaux matériaux qui revoient totalement nos méthodes de fabrication pour tendre vers une production plus propre et respectueuse de l'environnement à toutes les échelles. Pour finir, nous avons vu à travers l'évolution de la science-fiction que les artistes ont un rôle important à jouer dans l'imagination et l'innovation de notre société. La technologie s'associe de plus en plus avec la nature pour la sublimer et renouer le rapport entre l'Homme et le vivant.

Les artistes et les designers d'aujourd'hui ont de nombreuses cartes en main pour imaginer le monde de demain. C'est à nous d'utiliser les outils technologiques qui sont à notre disposition pour mettre en valeur le vivant et partager toutes ses richesses.

Interview

Sylvain Gaussens, motion designer

Afin de mieux cerner les enjeux du logiciel Houdini, j'ai pu m'entretenir avec le motion designer Sylvain Gaussens et lui poser quelques questions. Voici une retranscription de cette interview :

Pour commencer, peux-tu présenter rapidement ton parcours ? Qu'est-ce qui t'as conduit vers le motion design ?

Je suis autodidacte dans ce domaine mais pour faire une synthèse de mon parcours : je viens d'une filière technologique, à l'origine j'étais orienté vers l'industriel et l'électronique. Ma passion pour les ordinateurs m'a amené vers un DUT SRC (maintenant DUT MMI), où j'ai appris le développement web et les logiciels de la suite Adobe. J'ai rapidement découvert le motion design, ce qui m'a encouragé à passer beaucoup de temps à approfondir Illustrator et After Effects. Deux mois après mon DUT, j'ai signé un CDI avec le studio de production *Sonacom* ; j'ai travaillé ensuite dans l'agence *LaChose* puis au studio *17Mars*. Maintenant, je suis freelance à plein temps !

Dans tes films *Entropy* et *Stratum*, tu abordes des thématiques scientifiques et des concepts du domaine de la physique. Dans quelles mesures les phénomènes naturels t'inspirent ? Quelle place occupe la nature dans tes projets ?

Oui, comme beaucoup d'autres, la nature reste ma première source d'inspiration. Je m'inspire énormément des phénomènes naturels à différentes échelles, des paysages jusqu'aux macros des réactions chimiques. Ensuite, j'essaie toujours de les traduire graphiquement et d'apporter une touche de surréalisme. C'est d'ailleurs là que le logiciel Houdini devient une évidence et que Cinema4D atteint ses limites.

Comment as-tu approché le logiciel Houdini ? Qu'est-ce qui t'a attiré et pourquoi ?

Houdini est un logiciel qui peut faire peur aux premiers abords mais une fois que l'on passe les débuts de l'apprentissage, c'est impossible de le regretter ! Ce qui m'a toujours attiré dans ce logiciel, c'est le fait que l'utilisateur crée ses propres outils, contrairement à d'autres logiciels comme Cinema4D. De plus, on peut tout faire dans le même software : des océans, des paysages, des tissus, des liquides, de la fumée... La seule limite est celle de l'imagination !

Selon toi, quels avantages présentent les logiciels de génération procédurale et leurs structures nodales ?

Grâce à la structure nodale, les opérations ne sont pas limitées verticalement par ses voisins, comme ça peut l'être avec les calques dans After Effects par exemple. Ici, les opérations se forment en créant des réseaux où tout peut se connecter, ce qui rend le workflow encore plus rapide et optimal ! Cette structure ouvre la porte au "procédural", qui est à la base une méthode utilisée dans les jeux vidéo et le cinéma, car ils avaient besoin de milliers d'assets facilement déclinables. Dans le domaine du motion design, le procédural a rapidement trouvé sa place. Le mélange de l'animation, de la modélisation procédurale et de la direction artistique donne un potentiel créatif et technique assez fou et sans limite !

**Comment est-ce que le métier de motion designer va évoluer selon toi ?
Quelle place occupera le logiciel Houdini dans cette évolution ?**

Avec la crise actuelle et le télétravail, on observe de nouvelles dynamiques. Les clients commencent à faire davantage appel à des petits studios ou à des freelances spécialisés, de manière délocalisée. Je pense qu'il est possible dans l'avenir, que l'on observe des manières différentes de fonctionner entre le client et la production, plus de spécialisation et plus d'indépendance : le freelance va sûrement devenir la norme dans notre domaine. Houdini va prendre sa place dans le milieu du motion design, comme a pu le faire Cinema4D avant lui et devenir peu à peu un outil courant. SideFX travaille dans ce sens depuis quelques temps déjà, en rendant leur logiciel plus accessible à la communauté des motion designers. Donc je pense que l'écart technique va diminuer petit à petit et que ce logiciel sera de plus en plus présent dans notre milieu.

Bibliographie

I. Observer et comprendre le vivant

- Willmann. R, Voss.J. (2017). *The Art and science of Ernst Haeckel*
- Schmidt.A. (2014). *The Concept of Nature in Marx*
- Ropert. P. (2016). *Sur les parois des grottes, l'art du paléolithique en trois mouvements*
[<https://www.franceculture.fr/histoire/sur-les-parois-des-grottes-lart-du-paleolithique-en-trois-mouvements>]
- Monod. J. (1970). *Le hasard et la nécessité*
- Descartes. R. (1637). *Discours de la méthode*
- Clément. E, Demonque.C, Hansen-Leve. M, Kahn. P. (2008). *La philosophie de A à Z*
- Bindé. J. (2017). *Les médusantes créatures d'Ernst Haeckel*
[<https://www.beauxarts.com/grand-format/les-medusantes-creatures-dernst-haeckel/>]
- Lebrun. D. (2004). *Proteus* (film documentaire)
[https://www.youtube.com/watch?v=H1n_IBAhX6E]
- Hansen. P. (2014). *Art nouveau, Overview*
[<https://www.youtube.com/watch?v=P4luPnObQYo>]
- Kurzegesagt. (2018). *Why beautiful things make us happy*
[<https://www.youtube.com/watch?v=-O5kNPIUV7w&t=1s>]
- Che. J, Sun.X, Gallardo. (2018). *Cross-cultural empirical aesthetics*
[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079612318300025>]
- Shekhawat.K. (2015). *Why golden rectangle is used so often by architects : a maethematical approach*
[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>]
- Chatterjee. A. (2013). *The Aesthetic Brain : How we elolved to desire beauty and enjoy art*
- Jacobsen. T, Schubotz. R, Höfel. L, Cramon. Y. (2005). *Brain correlates of aesthetic judgment of beauty*
[<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16087351/>]

- Chatter. J, Vatanian. O, Coburn.A. (2017). *Building, Beauty, and the brain : A neuroscience of Architectural Experience*
[https://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1161&context=neuroethics_pubs]
- Nielsen. S, Fich. L, Roessler. K, Mullins. M. (2017). *How do patients actually experience and use art in hospitals ?*
[<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5328392/>]

II. Reproduire le vivant à l'heure du numérique

- Beattie.D. (2020). *The Art of code* (NDC Conferences, London)
[<https://www.youtube.com/watch?v=6avJHaC3C2U>]
- Louapre. D. (2017). *Le jeu de la vie*
[<https://scienceetonnante.com/2017/12/08/le-jeu-de-la-vie/>]
- Roberts. S. (2020). *The Lasting Lessons of John Conway's Game of Life*
[<https://www.nytimes.com/2020/12/28/science/math-conway-game-of-life.html>]
- Sims. K. (1994). *Evolving Virtual Creatures*
[<http://www.karlsims.com/papers/siggraph94.pdf>]
[<http://www.karlsims.com/evolved-virtual-creatures.html>]
- Reynolds. C. (1995). *Boids, background and update*
[<https://www.red3d.com/cwr/boids/>]
- The BITK. (2016). *The Mandelbrot set*
[<https://www.youtube.com/watch?v=56gzV0od6DU>]
- Jj. E. (2015). *Deux minutes pour Mandelbrot*
[<https://www.youtube.com/watch?v=Y4ICbYtBGzA>]
- Fataho. (2017). *Perlin noise explained*
[<https://www.youtube.com/watch?v=MJ3bvCkHJtE>]
- Zvar. C. (2008). *Fractal Noise - A New Look at an Old Friend*
[https://web.archive.org/web/20080618051135/http://library.creativecow.net/articles/zvar_chris/fractal_noise.php]
- The Art of Code. (2018). *Voronoi Explained*
[<https://www.youtube.com/watch?v=l-07BXzNdPw>]

- Khan Academy. (2019). *Voronoi partition and patterns*
[<https://www.youtube.com/watch?v=Q804hv73L6U>]
- Peterka, T, Morozov, D, Phillips, C. (2014). *High-performance computation of distributed-memory parallel 3D Voronoi and Delaunay tessellation*
[<https://www.osti.gov/servlets/purl/1164491#:~:text=In%203D%2C%20Voronoi%20faces%20are,is%20a%20dual%20Delaunay%20edge.>]
- Entagma. (2016). *Organic Voronoi patterns*
[<https://vimeo.com/172251306>]
- Tran, K. (2020) *How to Find the Nearest Hospital with a Voronoi Diagram*
[<https://towardsdatascience.com/how-to-find-the-nearest-hospital-with-voronoi-diagram-63bd6d0b7b75>]
- Sander, L. (2000) *Diffusion-limited aggregation: a kinetic critical phenomenon?*
[<http://www.thp.uni-koeln.de/krug/teaching-Dateien/SS2012/Sander2000.pdf>]
- Halsey, T. (2007). *Diffusion-Limited Aggregation: a model for pattern formation*
[<https://web.archive.org/web/20070405094836/http://aip.org/pt/vol-53/iss-11/p36.html>]
- Bourke, P. (1991). *DLA - Diffusion limited aggregation*
[<http://paulbourke.net/fractals/dla/>]
- Wang, S, Ji, H, Li, H, Zhan, Y. (2020). *Growth diffusion-limited aggregation for basin fractal river network evolution model*
[<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0011624>]
- Sanders, L. (2010). *Slime mold grows network just like Tokyo rail system*
[<https://www.wired.com/2010/01/slime-mold-grows-network-just-like-tokyo-rail-system/>]
- Parr, D. (2014). *Cities in motion: how slime mould can redraw our rail and road maps ?*
[<https://www.theguardian.com/cities/2014/feb/18/slime-mould-rail-road-transport-routes>]
- Arte documentary. (2021). *The Blob: A Superorganism without a Brain*
[https://www.youtube.com/watch?v=oH9h-_e827M]
- Tero, A, Takagi, S, Saigusa, T, Ito, K, Bebbler, P (2010). *Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design*
[<https://science.sciencemag.org/content/327/5964/439>]
- Sims, K. (2016). *Reaction-Diffusion tutorial*
[<http://karlsims.com/rd.html>]
- Turing, A. (1952). *The Chemical basis of Morphogenesis*
[<http://cba.mit.edu/events/03.11.ASE/docs/Turing.pdf>]

- Entagma. (2019). *Reaction Diffusion - Theory and implementation*
[<https://vimeo.com/170073069>]
- Nervous System. (2016). *Data-customized midsoles with New Balance*
[<https://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=7048>]
- Holmedal. S. (2017). *The Houdini Wizard: A Chat with Simon Holmedal*
[<https://www.schoolofmotion.com/blog/simon-holmedal-houdini-interview/>]
- Causeret. M. (2013). *Peindre avec des matières dynamiques : les systèmes procéduraux pour la création et l'expérimentation artistique*
[https://drive.google.com/file/d/0B-dI_P43uI1nanN2RIYzQTVOMEE/edit]

III. S'inspirer du vivant pour imaginer le monde de demain

- Chapelle. G, Raskin. K. (2020). *Humanité bio-inspirée une autre approche*
- Cité des sciences et de l'industrie. (2020). Exposition. *Bio-inspirée, une autre approche*
- Benyus. J. (1998). *Biomimétisme : quand la nature inspire des innovations durables*
- Pouydebat. E. (2019). *Le biomimétisme au secours des hommes*
[<https://www.franceculture.fr/emissions/de-cause-a-effets-le-magazine-de-lenvironnement/le-biomimétisme-au-secours-des-hommes>]
- Oxman. N. (2019). *Neri Oxman : Bio-Architecture, série documentaire Abstract : The art of design*
- Oxman. N. (2014-2020). *Aguahoja*
[<https://oxman.com/projects/aguahoja>]
- Andavolu. K. VICE, HBO (2020). *Printing tomorrow*
[<https://www.youtube.com/watch?v=GV8zPtqOyqg>]
- Linaard. J, Mediapart. (2019). *Rencontre avec l'écrivain de science-fiction Alain Damasio*
[<https://www.youtube.com/watch?v=addb60vjqx4>]
- Benoît. M, Science et Avenir. (2020). *L'armée française dévoile le nom des auteurs de SF de sa «Red Team», chargée d'anticiper les menaces du futur*
- Creative independant. (2016). *Björk on nature and technology*
[<https://www.bjork.fr/the-creative-independent-Bjork-on-nature-and-technology>]
- TRACKS - Arte. (2021). *Andrew Thomas Huang : les hyperréalités de Björk et FKA Twigs*
[<https://www.youtube.com/watch?v=IkbcAKIewHg>]

Remerciements

Je tiens à remercier mon tuteur Robert Léonard pour son suivi et ses recommandations, Louis-Jean Teitelbaum pour son accompagnement, Sylvain Gaussens pour son temps et ses réponses, ainsi que mes proches pour leurs relectures.

Nature & Design

Baptiste Lefebvre - DMII 2021