

Génération bio-inspirée de formes 3D artistiques pour l'impression 3D

C. Desprat¹, L. Barthe¹ et H. Luga¹

¹IRIT - Université de Toulouse

Abstract

Art always played a precursor role in the use of technology evolutions. Yesterday photography, then video, now biotechnologies and particle physics. 3D printing is one of the new fields of exploration that are offered. This paper presents an application that we made in order to investigate this open field. It generates, via a user-controlled process, models of 3D shapes structurally constrained to be 3D printed. Behind the term "generation", we refer to the use of bio-inspired process in that we "grow" something. They are intuitively understandable and they also offer a good balance between constraints and customization. A generative process (parametric L-System) initially allows to get a reference shape. Then, a genetic algorithm is used to explore how controlled the shape space "around" this reference is. The smooth and organic aspect is made through the use of convolution surfaces which also includes the property to give a closed form ideal for 3D printing.

Résumé

L'art a toujours joué un rôle de précurseur dans l'utilisation des évolutions technologiques. Hier la photographie, puis la vidéo, aujourd'hui les biotechnologies et la physique des particules. L'impression 3D fait partie des nouveaux champs d'exploration qui lui sont offerts. Ce papier présente l'application que nous avons créée visant à investiguer cet espace ouvert. Elle génère, via un processus supervisé par l'utilisateur, des modèles de formes 3D contraints structurellement pour pouvoir être imprimables. Le terme « génération » fait référence à l'utilisation des processus bio-inspirés dans le sens où on fait « pousser » quelque chose. Les mécanismes bio-inspirés se basent sur ce que l'on peut observer dans la nature. Ils sont donc intuitivement compréhensibles et offrent également un équilibre satisfaisant entre contraintes et personnalisation. Un processus génératif (L-Système paramétrique) permet dans un premier temps d'obtenir une forme de référence. Ensuite, on utilise un algorithme génétique pour explorer de façon contrôlée l'espace de forme « autour » de cette référence. L'aspect lisse et organique est rendu par l'utilisation des surfaces de convolution qui intègre également la propriété de donner une forme fermée idéale pour l'impression 3D.

Mots clefs :

Art évolutionnaire, algorithmes génétiques, modélisation géométrique, impression 3D.

1. Introduction

L'art évolutionnaire est un vaste domaine où se mêlent plusieurs disciplines comme la génétique, l'algorithmie, observation du vivant... Cette nouvelle forme d'art puise son inspiration dans la biologie et la théorie de l'évolution de Darwin [Dar59]. C'est le cadre idéal pour générer le design d'un objet capable de s'adapter à un environnement avec des contraintes comme l'impression 3D. Considérée comme la future révolution industrielle, cette technologie tend à produire de nouveaux usages culturels et technologiques. Or actuellement, peu d'outils sont accessibles au grand public, lui permettant de faire le pont de la génération du modèle virtuel à la fabrication complète afin de s'approprier cette nouvelle technologie avec ses contraintes (matériaux, types d'impression...). Ce type d'outil est intéressant pour les

néophytes qui ne possèdent pas de compétences dans le domaine de la 3D (virtuelle et/ou physique) mais peuvent quand même créer des formes et les fabriquer. Quant aux artistes, c'est un nouveau medium, permettant d'explorer de nouveaux espaces de formes pas nécessairement pensés auparavant en obtenant une réalisation à la fin.

Le design évolutif et son implémentation (algorithme génétique) [Gol02] sont basés sur la compréhension et l'intégration de l'innovation humaine. D'après Lee [Lee02], l'évolution de la modularité et la spéciation, apparition d'une nouvelle espèce à partir d'autres espèces, va révéler la structure du *design* évolutionnaire final. L'évolution de plusieurs représentations amène plus rapidement et plus efficacement les cycles de conception. Ces deux buts se retrouvent à travers l'approche génétique qui est capable de faire évoluer des systèmes de complexité variable, modulaires et la spéciation dans n'importe quelle combinaison. La reproduction sélective interactive, est particulièrement adaptée à une approche artistique où l'esthétique est subjective et difficile à

formaliser, permet de faire participer l'utilisateur au choix de la forme par le biais de la sélection qui l'intéresse parmi un panel de formes. Cette implication dans le processus artistique permet de remplacer les techniques déterministes généralement utilisées [Whi04].

En comparant (cf. Table 1), les différents types de génération procédurale évolutionnaire étudiés comme les automates cellulaires [Neu66], les grammaires de formes [Sti72] et les L-Systèmes [Lin68], nous avons choisi de nous intéresser aux L-Systèmes. En tant que grammaires formelles elles décrivent une topologie et non une géométrie avec une croissance par insertion. Cela induit que l'espace se construit au fur et à mesure de l'évolution ce qui le rend plus facile manipuler quand on ne sait pas à quel type de forme s'attendre.

Méthode	Croissance	Représentation
Automate cellulaire	Par agrégation	Topologique
Grammaire de formes	Par insertion	Géométrique
L-Système	Par insertion	Topologique

Table 1 Comparaison des méthodes de génération procédurale

Une façon de superviser la génération de formes est d'utiliser un algorithme génétique. Les algorithmes génétiques sont une classe d'algorithmes basés sur le processus d'adaptation de l'évolution naturelle, initiés dans les années 1970 par Holland [Hol75],[Gol89]. Les algorithmes génétiques agissent alors comme des outils d'optimisation et de génération de formes.

Parmi les méthodes de modélisation 3D surfaciques, les surfaces implicites introduites par Ricci [Ric73] et Blinn [Bli82] sont intéressantes du fait de leurs qualités de modélisation assez intuitives. Les surfaces implicites ont l'avantage de créer des formes lisses (voire organiques) et les mélanges d'objets opèrent de bons rendus.

Notre contribution, développée pendant un projet de master, propose de formaliser une combinaison de méthodes pour générer des formes 3D artistiques et imprimables car aucun modèle ne propose de solution complète pour générer et construire un objet artistique avec une imprimante 3D. Cet article explique comment s'articulent les méthodes de génération procédurale évolutionnaires et les méthodes de modélisation et de rendu 3D. Le L-Système paramétrique (Section 2) offre une base à la génération de formes. De son interprétation graphique, résulte un squelette 3D nous permettant d'obtenir une forme en une seule composante. La génération supervisée repose sur un algorithme génétique (Section 3), offrant à l'utilisateur d'explorer un espace de formes 3D qui garantit les critères topologiques que nous avons jugés minimum pour l'impression (une seule composante, surface fermée, épaisseur pas trop fine) en ne se focalisant que sur sa démarche artistique. Chaque squelette généré avec le L-Système et l'algorithme génétique est « habillé » d'une surface implicite de convolution (cf. Section 4) offrant une surface de genre 2 (fermée) et le contrôle du rayon de convolution pour éviter une épaisseur trop fine à l'impression. De plus, le rendu par surface implicite est assez esthétique (lisse et coloré). En donnant l'accès à une interface (cf. Figure 1) multiplateforme, conviviale et créative (visualisation des

formes 3D générées, itération du L-Système, contrôle de l'algorithme génétique...) ainsi que des moyens de concrétisation accessibles, l'utilisateur acquiert une autonomie dans la création et dans la réalisation concrète d'objets en 3D (cf. Section 5).

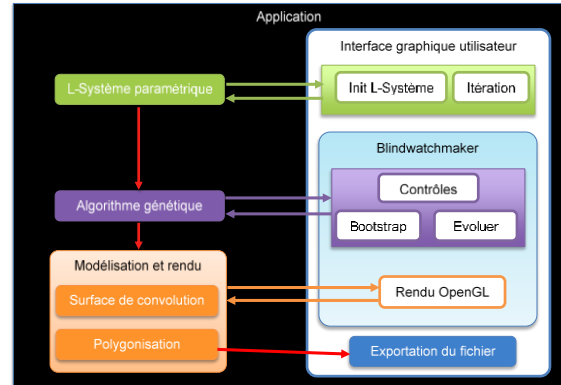


Figure 1 Schématisation de la vue d'ensemble du système

1.1. Travaux relatifs

L'interaction entre les progrès de l'impression 3D et la création artistique sont catalyseurs notamment dans le domaine scientifique. En avril 2013, l'artiste Shane Hope [Hop13] a présenté ses œuvres non seulement imprimées en 3D mais en intégrant l'échelle nanoscopique (la structure moléculaire des objets) à son travail. En 2012, Oxman [Oxm12] a présenté ses travaux sur l'impression 3D. Principalement tourné vers le *design* et les matériaux, notamment l'intégration de plusieurs matériaux dans une même structure, le type de ressources utilisé (imprimante 3D multi-matériau, matériaux, laboratoire) dans ses créations est très peu accessible car rare et cher.

Les frontières des catégories d'application de conception informatique utilisant les concepts liés à la vie artificielle décrites par Bentley [Ben99] sont assez perméables mais elles permettent de distinguer les intentions et les méthodes utilisées pour obtenir un *design* ou une forme. Plusieurs travaux d'art évolutionnaire sont concentrés sur l'évolution interactive comme *NEvAR* [Mac00], *PicBreeder* [Sec08] *Endlessforms* [Clu11b] et Bailly Salins et Luga [Bai07]. Ces applications mettent l'utilisateur au centre de la création et proposent un rendu esthétique (comme les surfaces implicites). Cependant, les algorithmes génératifs utilisés ne proposent pas des formes 3D en une seule composante et encore moins la possibilité de les contraindre pour l'impression 3D.

Les contraintes structurelles (RDM) sont présentes au cœur des logiciels évolutionnaires de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) comme *EvoCAD* [Fun00], *MultiCAD-GA* [Vas02] ou encore *GENR8* [Tes04], [Hem08]. *GENR8* permet à l'architecte de personnaliser les contraintes en fonction de son besoin, ce qui ajoute à la création. Cependant ce type de logiciel est conçu pour s'adresser à des professionnels qui ont la connaissance du métier. Face à la quantité d'information que doit cerner l'utilisateur, le recours aux algorithmes évolutionnaires permet de déléguer au système l'exploration et l'optimisation des solutions pour des problèmes complexes [Fas07] et le laisse très libre dans le choix de la supervision tout en s'abstrayant des contraintes

structurelles (optimisation). Cet aspect laisse plus de place à la créativité.

2. Le L-Système paramétrique comme référence

L'intérêt du L-système [Lin68] réside dans le concept de réécriture. En effet, à chaque itération, les règles de réécriture vont être appliquées récursivement à l'objet courant pour donner un objet complexe. Ainsi, grâce à son rôle d'amplificateur [Smi84], le L-système peut générer des modèles complexes à partir de peu d'informations et de règles définissant le monde.

Il existe plusieurs types de L-système évolutionnaires [Mac08] et nous avons choisi d'implémenter un L-Système paramétrique déterministe. L'aspect paramétrique intègre la problématique de contrainte et de liberté dans la création car il permet d'exprimer un intervalle de valeurs, de modéliser des phénomènes continus. Les paramètres facilitent la manipulation du modèle, notamment par l'utilisation des règles de génération. Nous supposons que l'aspect déterministe du L-Système paramétrique permet à l'utilisateur de mieux intégrer mentalement la référence sur laquelle il se base lors de la supervision. Un L-Système paramétrique repose sur les mêmes bases qu'un L-Système simple. Il rajoute la possibilité de conditionner un (ou plusieurs) paramètres d'une variable sur une règle. Cette condition est une des clés pour intervenir au niveau des contraintes structurelles. En effet, il est important pour nous de pouvoir contrôler certains aspects (structurels) de la génération tout en laissant beaucoup de liberté lors de la création. L'utilisation des paramètres est moins un outil de contrainte que de création car en permettant de démultiplier les possibilités, on laisse l'utilisateur très libre dans ses choix de règles. Exemple de L-Système paramétrique où a et b sont des variables et x et y sont des paramètres:

- Chaîne : $a(0,2)b(0,0)a(1,2)$
- Règle de production :
 $a(x,y) : x = 0 \rightarrow a(1,y+1)b(2,3)$
- Résultat : pour $a(0,2)$ qui devient $a(1,3)b(2,3)$ à l'itération suivante.

L'interprétation graphique 3D du L-Système, basée sur un « *turtle graphics* » 3D, nous permet de construire la topologie du L-Système et ainsi d'obtenir un squelette continu (graphe non complet) ce qui sera utile lors de la modélisation 3D pour obtenir une forme en une seule composante. Cette méthode de programmation par vecteurs graphiques utilise un curseur relatif (la tortue) permettant de se déplacer dans l'espace (2D, 3D) [Abe81] de manière continue. Cette méthode est beaucoup utilisée dans l'exploration de design 3D [Coa99] [Hor01]. Les caractères utilisés pour symboliser les déplacements de la tortue avec un L-Système correspondent à trois catégories : l'avancement, la rotation autour d'un axe et la sauvegarde. Chacun des symboles est associé à un paramètre (valeur d'avancement ou d'angle) sauf les symboles de sauvegarde. La notation par chaîne parenthésée (avec les symboles de sauvegarde) permet d'introduire la notion de graphes non complets et ainsi d'obtenir une grande variabilité dans le squelette. Une parenthèse ouverte représente la sauvegarde d'un état (*push*) alors qu'une parenthèse fermée permet de revenir à l'état de sauvegarde précédent (*pop*). Cependant cette notation peut poser des

problèmes de consistance (validité) lors de la génération de formes.

3. Supervision utilisateur par algorithme génétique

La programmation génétique est une méthode automatique s'appuyant sur des mécanismes de l'évolution mis en évidence par Darwin dans la théorie de l'évolution [Dar59] pour résoudre des problèmes variés (optimisation, exploration...) [Ben99]. Elle permet par expérimentations successives d'approcher une solution répondant à un problème donné sans que l'utilisateur ait à considérer l'approche algorithmique et mathématique de la génération. Un aspect important est de garantir une certaine logique dans les choix et dans les paramètres proposés à l'utilisateur afin qu'il puisse ressentir l'impact de ses manipulations lors du processus. Cette technique utilise des algorithmes évolutionnaires tels que les algorithmes génétiques pour faire évoluer une population qui s'adapte à son environnement (qui correspond au problème posé). Après évolution, la population de formes générées constitue un ensemble de solutions (créations) potentielles. Ici, le jugement subjectif de l'utilisateur est le facteur essentiel de l'évaluation. L'intervention d'une méthode d'évolution interactive comme « *blind watchmaker* » (l'horloger aveugle) [RDa86] est pertinente afin de mettre en avant la sensibilité de l'utilisateur pour certaines formes et de faire ressortir les aspects qu'il préfère en faisant évoluer ses choix. Cette méthode est une approche bio-inspirée qui permet d'intervenir dans le processus de sélection des créatures développées en sélectionnant la meilleure créature lors de chaque génération de l'algorithme génétique. Ce type d'application insiste sur l'importance du rôle de la sélection dans l'évolution. C'est le moteur principal des opérations évolutionnistes de notre application. En nous basant sur l'algorithme génétique simple en cinq étapes présenté par Holland [Hol75],[Gol89], nous avons ajouté une étape de validation des génomes après certaines étapes clés (étape 2 et étape 4). Chaque génome contient trois chromosomes correspondant aux valeurs de couleur de la forme, aux symboles et aux paramètres des symboles.

L'étape 1 correspond à l'initialisation de l'algorithme génétique. Elle s'appuie sur un génome de référence (le résultat après itération d'un L-Système paramétrique). Le génome de référence contient un alphabet de symboles associés à des paramètres (angle, avancement). Les options d'évolution sont intégrées à la génération (couleurs, symboles, paramètres, taux de croisement et de mutation).

Lors de l'étape 2, la population initiale de formes est générée pseudo-aléatoirement à partir du génome de référence. Cette référence nous donne la « taille » de la forme (un alphabet de symboles et un nombre déterminé de symbole avec des paramètres) et des valeurs pour la couleur. Les nouvelles formes piochent aléatoirement dans cet alphabet pour se construire une structure de la même « taille ». Les valeurs des paramètres et des couleurs sont prises aléatoirement de la forme de référence (à un delta près). Ainsi, la nouvelle population « ressemble » à la référence de par les symboles utilisés et les valeurs proches générées. Chaque « pas » d'évolution est effectué par l'utilisateur. L'algorithme est donc dépendant des aléas des choix de l'utilisateur (sélection, taux de mutation, nombre de croisements).

Pour chaque forme générée, nous ajoutons l'étape de validité des génomes. Elle s'applique à vérifier la consistance du génome et plus particulièrement de la suite de symboles notamment en ce qui concerne le couple *push/pop*. En effet, il faut au moins avoir un *push* avant de faire un *pop* lié à ce *push*. Pour parer ce cas de figure, le *pop* est muté jusqu'à obtenir une consistance valide pour la forme.

À l'étape 3, l'évaluation des formes est effectuée. Ici, c'est l'utilisateur qui remplace la fonction d'évaluation.

En validant son choix de forme(s), l'utilisateur entre dans le cycle itératif d'évolution (étape 4) avec l'algorithme. Cette étape détermine l'orientation que prend l'utilisateur induite par ses choix dans l'espace de formes. Cela permet à l'algorithme de sélectionner les formes qui seront soumises aux opérateurs génétiques de croisement et de mutation. L'opérateur de croisement s'applique sur deux parents et permet de créer deux formes enfants qui sont un mix des deux parents. Après avoir choisi le point de croisement dans le génome, on intervertit les gènes des deux parents pour faire les génotypes enfants. La mutation consiste à changer aléatoirement une valeur d'une variable ou d'un paramètre sur une forme.

Comme après toute modification d'un génome, on applique la vérification de la consistance du génome comme expliquée ci-dessus.

Puis est opéré le remplacement de la population dit « générationnel » ; la totalité des enfants créés remplace la totalité des parents. Le processus se termine à l'étape 5 lorsque l'utilisateur choisit d'arrêter l'évolution.

4. Surface implicite de convolution : modélisation et contrôle de l'épaisseur

Notre hypothèse est de pouvoir créer une forme 3D qui soit en une seule composante et que l'épaisseur de la forme soit suffisante pour être imprimée en 3D (par expérience, supérieure à 2mm d'épaisseur).

Les surfaces implicites sont un choix naturel pour la construction d'une surface lisse voire organique avec l'utilisation de processus bio-inspirés comme le L-Système et l'algorithme génétique. Opposé aux modèles paramétriques qui explicitent les coordonnées des points, le formalisme implicite définit une surface comme un ensemble de points de l'espace vérifiant une propriété. Cette propriété est liée à la valeur prise en ces points par une fonction potentiel $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ qui à tout point $P(x_p, y_p, z_p)$ de l'espace \mathbb{R}^3 associe une valeur de potentiel C_p . On définit alors une surface implicite par l'ensemble des points de \mathbb{R}^3 pour lesquels la fonction f associe la même valeur de potentiel C_0 . De plus, les méthodes de modélisation par surfaces implicites possèdent de bonnes propriétés de mélange. Les surfaces de convolution sont un type particulier de surfaces implicites capables d'engendrer une surface lisse autour d'une courbe squelette, constituée de segments, de droites ou d'arcs de cercle.

Pour être capables d'utiliser les squelettes issus de la représentation Turtle graphics comme squelettes en évitant les problèmes de gonflement (« bulge ») [Blo97],[Wyv88] à la jointure des segments qui se posent en artefact indésirables, nous nous sommes inspirés des travaux de Bernhardt et al. [Ber08] en basant notre méthode sur la

définition des surfaces de convolution homothétiques à base de squelette proposée par Zanni et al. [Zan12]. Ces surfaces sont contrôlées par un squelette qui correspond à l'arbre de composition de la surface implicite. Elles proposent également une gestion de l'épaisseur à chaque extrémité de segment. Par interpolation de ces points, la surface de convolution est construite pour chaque segment du squelette. Cette propriété permet de contrôler en général (pas en cas de mélange) un rayon minimal d'épaisseur pour la pièce lorsqu'elle sera imprimée et ainsi réduire sa fragilité potentielle. Nous profitons du parcours de l'arbre pour assigner une couleur à chaque sommet du squelette du segment pour associer une couleur au poids (rayon). Cette couleur va également être interpolée d'un rayon à l'autre. Les valeurs de couleurs sont récupérées à partir du code génétique de la forme. Une fois l'arbre du squelette construit, il est préparé à l'évaluation pour pouvoir visualiser la surface de convolution (qui jusqu'à maintenant ne correspond qu'au noyau de l'équation). Une approximation de l'iso-surface est calculée dans le but de polygoniser la surface implicite avec un *Marching Cubes* [Lor87]. Le maillage obtenu par polygonisation de la surface de convolution contient les informations de couleurs, les normales et les points (vertex) de l'objet qui vont être affichés à l'utilisateur grâce à l'interface de programmation OpenGL.

5. L'impression : du modèle à l'objet 3D

Toutes les technologies connues sont basées sur la découpe de l'objet virtuel 3D en lamelles 2D de très fine épaisseur (suivant la précision de l'imprimante). Ces fines lamelles sont déposées une à une en les fixant sur les précédentes, ce qui reconstruit l'objet réel. Les techniques et matériaux d'impression 3D sont très divers : la stéréolithographie (SLA) utilise de la résine UV, le frittage sélectif par laser (SLS) agglomère de la poudre (Selective Laser Sintering - SLS) et le dépôt de fil polymère (Fused Deposition Modeling - FDM) consiste à utiliser une tête d'extrusion chauffée et fond un filament de matière plastique (ABS, PLA) pour construire une à une les couches de l'objet 3D. Ces configurations s'appuient sur différentes contraintes.

Dans notre cas, nous avons choisi la technique de FDM avec du PLA sur une imprimante 3D RapMan mono-buse pour des raisons de disponibilité au FabLab Artilect de Toulouse (<http://artilect.fr/>) mais aussi parce que la technique et le matériau comptent parmi les plus répandus actuellement. Le format de fichier PLY que nous utilisons est compatible avec la plupart des logiciels de modélisation 3D ainsi qu'avec les imprimantes (mono/multicolore).

La préparation pour l'impression 3D demande l'intervention d'un logiciel de pré-impression (Axon2) à plusieurs niveaux :

- Retouches du modèle 3D : échelle et positionnement adaptés à l'impression.
- Configuration du modèle par rapport à l'imprimante 3D utilisée : matériau, précision, ajout d'un support, remplissage de la forme.
- Estimations liées à la fabrication : temps, quantité de matière, coût, poids.
- Conversion du modèle configuré dans un langage compréhensible par l'imprimante 3D.

En donnant ce dernier point à l'imprimante 3D, et en patientant un peu l'utilisateur obtient sa création artistique sous forme d'objet 3D.

6. Résultats

Notre application fournit plusieurs fonctionnalités pour générer des formes 3D et explorer les modèles résultants. Ces fonctionnalités sont :

- Choisir la taille du panel de formes (4, 9, 16) à faire évoluer.
- Itérer le L-Système de référence
- Pour le *blind watchmaker* (algorithme génétique) :
 - Sélectionner des formes parmi le panel
 - Initialiser la population
 - Choix du type d'évolution
 - Taux de croisement et de mutation
 - Génération suivante
- Manipulation des modèles 3D : plusieurs angles, zoom
- Exportation du modèle au format PLY.

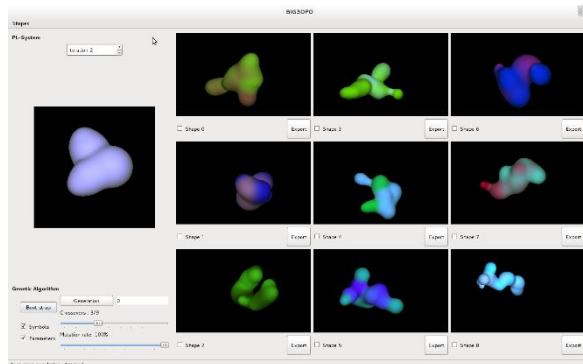


Figure 2 Aperçu de l'interface de l'application

Le L-Système par défaut, agissant en tant que référence, a toujours le même comportement au cours des itérations. L'itération du L-Système détermine quels sont les symboles et les valeurs des paramètres disponibles. Le fait d'itérer sur plusieurs niveaux permet de modifier ces ensembles. La Figure 3 montre un exemple d'itération du L-Système de référence.

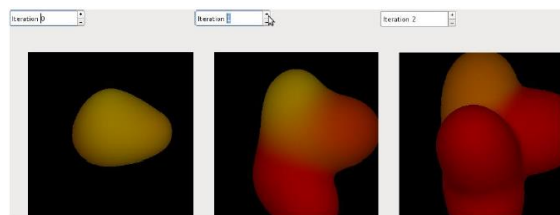


Figure 3 : Itération du L-Système de référence sur trois niveaux

La Figure 4 montre les figures générées lors de l'initialisation d'une population de neuf formes à partir d'une forme de référence. L'évolution porte à la fois sur les symboles et les paramètres. La génération offre un panel de formes très varié (couleur, structure).

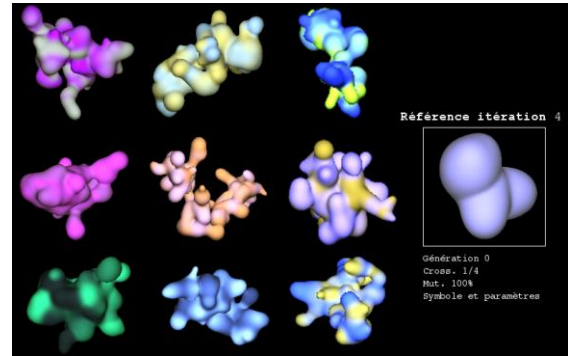


Figure 4 : Initialisation d'une population de neuf formes

La partie concernant les paramètres d'évolution (Figure 5) est cruciale et plus particulièrement ce à quoi l'utilisateur applique l'évolution. En effet, on peut appliquer l'évolution sur les symboles et/ou sur les paramètres. Suivant ce choix on observe des résultats de populations plus ou moins ressemblantes au génome de référence. Les effets observés dans les trois cas possibles sont :

- Évolution sur les paramètres : les symboles resteront les mêmes, donc la structure de la forme reste identique. Seules les valeurs des paramètres vont subir une évolution. On observe donc plus de ressemblance entre les formes.
- Évolution sur les symboles : les paramètres seront identiques à ceux du L-Système de référence. Nous permettons au programme d'utiliser le symbole qu'il souhaite parmi les symboles présents dans le L-Système de référence.
- Évolution sur les paramètres et les symboles : ce cas est un mix des deux précédents.
- Après plusieurs générations l'utilisateur peut chercher à conserver le même type de formes (converger) ou bien à diversifier au maximum sa population (diverger). Dans ces deux cas, il a la possibilité de manipuler plusieurs paramètres comme le taux de croisement et de mutation ou encore de choisir sur quoi il souhaite faire évoluer ses formes (symbole et/ou paramètre). L'ajout de l'évolution sur les couleurs et la possibilité de les exporter dans le modèle 3D sont des fonctionnalités appréciées par les utilisateurs.

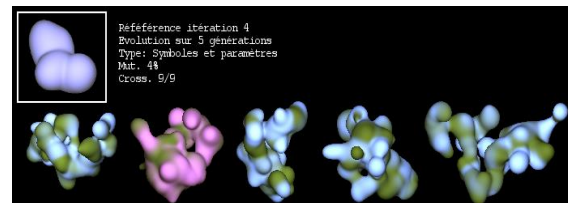


Figure 5 : Évolution sur cinq générations : exemple de forme provenant de chaque génération.

Lorsque l'utilisateur a arrêté son choix sur une forme il peut exporter le modèle 3D correspondant (Figure 6.a). Ce modèle est soumis au logiciel de pré-impression (Figure 6.b). On remarque que lors de la pré-impression, le logiciel ajoute un support à la pièce pour faciliter sa construction.

L'impression 3D est effectuée sur une imprimante RapMan 3.2 (Figure 6.c). La buse d'extrusion applique le matériau couche par couche jusqu'à obtenir le modèle de pré impression complet. Le temps d'impression a été de

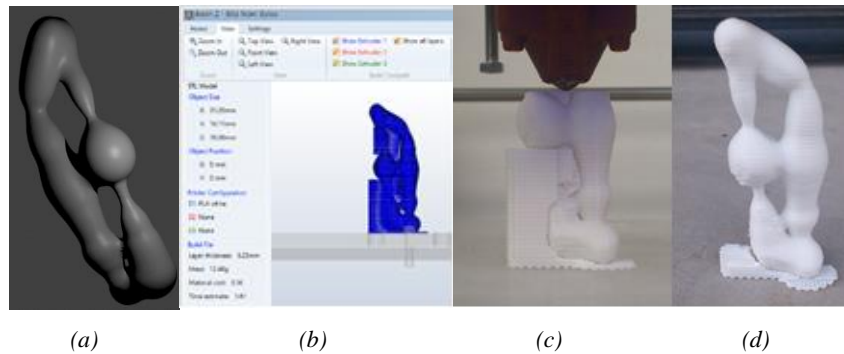


Figure 6 : Aperçu de l'exportation du modèle 3D (monochrome) dans Blender (a) et de la pré-impression du modèle 3D dans Axon2 (b) le modèle est imprimé en 3D avec une RapMan 3.2 en plastique PLA (c) et (d).

1h40 pour un objet de 8cm*2cm*2cm. Ensuite, il faut retirer le support (du même) matériau pour obtenir l'objet 3D qui avait été modélisé (Figure 6.d).

6.1. Performances

Les tests précédents ont été effectués sur des machines classiques sans ressources particulières. Les résultats des générations montrent que la mémoire vive sature rapidement suivant la taille des formes. L'affichage du rendu par surface de convolution est très rapide pour des petites formes. Lorsqu'elles croissent, l'allocation de mémoire devient très importante car on alloue toute la boîte qui englobe la forme. En ce qui concerne le L-Système, l'allocation mémoire n'est pas optimisée non plus et limite également le nombre d'itérations. L'algorithme génétique, étant basé sur le L-Système, subit également le manque d'optimisation, notamment lors des croisements sur des gros L-Système. L'affichage d'une forme générée prend entre 0,3 seconde et 2 secondes suivant sa taille (plus elle est grosse, plus cela prend de temps).

6.2. Retours utilisateurs informels

Après 10-15 minutes d'essai et d'explications, l'utilisateur a une prise autonome sur l'application. Les retours concernent principalement l'interface et la génération. L'interface est un peu difficile d'abord car elle concentre beaucoup d'éléments sur peu d'espace. L'utilisateur expérimente à tâtons les réglages d'itération et d'évolution. Certaines générations mettent longtemps à être calculées ce qui rend inaccessible l'interface. L'utilisateur a apprécié d'être prévenu par la barre d'information. La possibilité de passer en plein écran est agréable car elle permet d'avoir une meilleure visibilité des formes. De plus, l'accès aux paramètres de l'algorithme génétique et du L-Système apporte plus d'interactivité et une meilleure personnalisation de la forme. L'utilisateur a l'impression de créer une forme artistique.

La visualisation des formes induit une décision dans les choix de sélection même si le résultat n'est pas toujours celui escompté. Cette frustration n'empêche pas de continuer la génération de forme ou de les apprécier. En ce qui concerne les couleurs, certains utilisateurs ont cru qu'elles avaient un rôle dans l'évolution (ce qui n'est pas le cas). Ils ont apprécié l'impression de diffusion de la couleur, cependant l'impossibilité de paramétrer les

valeurs a été pointée. L'impossibilité de revenir à une étape précédente de l'évolution est souvent revenue.

Lors de l'export une boîte de dialogue aurait été appréciée. L'import dans le logiciel 3D et les manipulations de bases ont été faciles pour les utilisateurs ayant déjà effectué ce genre de manipulations avant. Les utilisateurs étaient contents de retrouver les couleurs avec la forme après l'export. Les utilisateurs ont eu l'impression de créer des formes artistiques et sont prêts à aller jusqu'à l'impression 3D.

7. Discussion

Les résultats de l'application sont satisfaisants au niveau visuel et bien rendus par les surfaces de convolution. Les formes 3D générées ont toutes les conditions idéales que nous avons énoncées pour les rendre imprimables (même en couleur) car les modèles 3D sont des surfaces en une composante, fermées, dont l'épaisseur est contrôlée.

L'application multiplateforme nécessite peu de temps de prise en main pour les utilisateurs non préparés. Les fonctionnalités présentes leur offrent un large champ de visualisation et un panel de paramètres très divers pour l'exploration. Une interface simple et un contrôle quasi-total laissent beaucoup de libertés dans la création. Cependant, le L-système n'est pas beaucoup mis en valeur dans cette version de l'application car il n'est pas personnalisable. Cela permettrait à l'utilisateur de mieux intégrer le processus évolutionnaire et surtout de pouvoir lui-même choisir la référence de son évolution.

Nous avons remarqué que l'inclusion de l'évolution sur les paramètres est assez perturbante pour l'utilisateur car elle ne reflète aucunement le L-Système de référence. Ses choix d'exploration des formes 3D sont strictement déterminés par l'approche visuelle donc nous supposons que son attente est plus dirigée vers une croissance évolutive (sur les paramètres) conservant une topologie similaire obtenue par une structure qui ne subit pas trop de modifications. Or dans le cas de l'évolution sur les symboles, aucune différence sémantique n'est faite entre les symboles (alors qu'il y en a une !) : le symbole d'avancement est visible car il crée une branche du squelette, alors qu'une rotation ne fait que changer l'orientation de la tortue, ce qui ne se voit pas. Les formes sont donc différentes dans leur structure, ce qui les rend beaucoup moins ressemblantes.

Le *blind watchmaker* est bien dans son rôle d'exploration permettant à l'utilisateur de faire des choix de convergence ou divergence des formes durant l'évolution ou en agissant sur les différents paramètres d'évolution. L'algorithme génétique propose une évolution pas à pas en se basant sur une forme de référence. Cette forme de référence est un L-Système paramétrique déterministe qui, à l'aide de règles, est contraint structurellement de façon intrinsèque. Ainsi, l'utilisateur se sert de cette forme de référence pour démarrer sa création. Nos résultats montrent l'intérêt de l'implication de l'utilisateur dans le choix des formes : en dirigeant l'exploration, plusieurs utilisateurs ont exprimé l'intérêt de leurs choix, les raisons de tels choix...

Le rendu esthétique apporté par les surfaces de convolution est soutenu par les résultats de [Bai07] permettant de créer des formes libres grâce à la combinaison de surfaces implicites. Nos résultats confirment ceux de [Ber08] en montrant que les surfaces de convolution offrent un bon rendu et des performances permettant une bonne interactivité avec l'utilisateur.

La configuration pré-impression nécessite d'être assistée car les réglages sont propres à l'imprimante (ajout du support, remplissage de la forme...). Le résultat produit par l'imprimante 3D est fidèle au modèle injecté.

Nous estimons que l'outil que nous proposons permet une démarche artistique complète en accompagnant l'utilisateur dans son processus de création unique, constitué d'une succession de choix propres à l'utilisateur, dans le but d'imprimer un modèle 3D.

8. Conclusion

Cet article présente un assemblage de méthodes visant à procurer un outil multiplateforme de génération supervisée par l'utilisateur de modèles 3D. Les utilisateurs novices qui n'ont pas de connaissances particulières du domaine vont pouvoir créer sans être contraints par la technique (modélisation 3D, contraintes impression). Pour les artistes, c'est un nouveau médium de création dans l'exploration de forme pour créer des œuvres en 3D. Les formes 3D produites sont d'aspect lisse, tubulaire et coloré en une seule composante, fermée, d'une épaisseur admissible à l'impression 3D. À travers l'interface de supervision de la création, basée sur un algorithme génétique, l'utilisateur peut se concentrer sur ses choix de formes et de paramètres sans se préoccuper des contraintes structurelles que peuvent porter les algorithmes.

Certaines retouches ergonomiques comme la possibilité de revenir à un état antérieur d'une évolution pour avoir plusieurs branches d'évolution et personnaliser le L-Système de référence (créer ses règles...) permettraient à l'utilisateur d'être totalement maître de sa création et de mieux comprendre les mécanismes évolutionnaires.

Outre une phase d'optimisation des algorithmes et des calculs (notamment l'implémentation d'une variante adaptative du Marching Cubes utilisant l'algorithme de Bloomenthal [Blo87] pour la polygonisation des surfaces de convolution), plus d'informations sur les contraintes physiques et les propriétés matérielles sont à apporter pour pouvoir être certain de la fiabilité de l'objet pour l'impression 3D. En faisant une estimation de la masse par cylindres généralisés ou en calculant le volume implicite

de la forme, on peut en déduire sa masse si l'on connaît le type de matériau. En nous appuyant sur les travaux de [Sta12], nous pourrions proposer un système de réparation de l'objet si son physique est soumis à des propriétés d'effort ou d'appui qu'il ne peut pas gérer. Il serait peut-être intéressant d'ajouter un module qui vérifie ce type de propriétés en fonction de l'imprimante et du matériau utilisé afin d'éviter l'intervention trop fréquente de l'ajout d'un support et peut-être un passage plus rapide de l'application à l'imprimante. L'intérêt d'une gestion des contraintes matérielles liées aux contraintes structurelles et environnementales de l'objet est un but également visé dans la conception architecturale, ce qui peut ouvrir à transposer notre processus à un autre domaine.

9. Références

- [Whi04] WHITELAW, M., 2004.
- [Sti72] STINY, G. & GIPS, J. : *Information Processing 71* (North-Holland Publishing Company, 1972), pp. 1460–1465.
- [Lin68] LINDENMAYER, A. : Mathematical models for cellular interaction in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology* (18), 280-289 (1968).
- [Ric73] RICCI, A. A. : Constructive Geometry for Computer Graphics. *The Computer Journal* 16, 157-160 (1973).
- [Bli82] BLINN, J. F. : A Generalization of Algebraic Surface Drawing. *ACM Transactions on Graphics*, 235-256 (1982).
- [Hop13] HOPE, S., Disponible à <http://shanehope.info/> (2013).
- [Oxm12] REVOLUTION IN ART & DESIGN USING 3D PRINTING | OBJET FOR NERI OXMAN : film produit par Stratasys (2012).
- [Ben99] BENTLEY, P. J., 1999.
- [Mac00] MACHADO, P. & CARDOSO, A. : *NEvAr – The Assessment of an Evolutionary Art Tool.*, presented at Proceedings of the AISB00 Symposium on Creative & Cultural Aspects and Applications of AI & Cognitive Science, Birmingham, UK, 2000 (non publié).
- [Sec08] SECRETAN, J. *ET AL.* : *Picbreeder: Evolving pictures collaboratively online.*, presented at Proceedings of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems, New York, 2008 (non publié).
- [Clu11b] CLUNE, J. *ET AL.* : Endlessforms, Disponible à <http://endlessforms.com/> (2011).
- [Bai07] BAILLY-SALINS, I. & LUGA, H. : Artistic 3D Object Creation Using Artificial Life Paradigms. *Smart Graphics (Umr 5505)*, 1–11 (2007).
- [Fun00] FUNES, P. . L. L. . P. J. : EvoCAD: Evolution-assisted design, 21–24 (2000).
- [Tes04] TESTA, P. & WEISER, D. : Emergent Structural Morphology. *Architectural Design* 74 (2004).
- [Hem08] HEMBERG, M., O'REILLY, U.-M., MENGES, A., JONAS, K. & DA COSTA GONÇALVES, M. : *The*

- Art of Artificial Evolution : a handbook on evolutionary art and music* (Springer, 2008), pp. 167-188.
- [Fas07] FASOULAKI, E. : *Genetic Algorithms in Architecture: a Necessity or a Trend?*, presented at Generative Art Conference, 2007 (non publié).
- [Smi84] SMITH, A. : *Plants, fractals, and formal languages*, presented at Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1984 (non publié).
- [Mac08] MACCORMACK, J. : *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design* (Springer, 2008), pp. 169-197.
- [Coa99] COATES, P., BROUGHTON, T. & JACKSON, H. : *Evolutionary Design Using Computers* (Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999), pp. 323-341.
- [Hor01] HORNBY, G. S. & POLLACK, J. B. : *In Congress on Evolutionary Computation* (IEEE Press, 2001), pp. 600-607.
- [Wyv88] WYVILL, B. & WYVILL, G. : Field Functions for Implicit Surfaces. *New Trends in Computer Graphics*, 328-338 (1988).
- [Ber08] BERNHARDT, A., PIHUIT, A., CANI, M. P. & BARTHE, L. : *Matisse : Painting 2D regions for Modeling Free-Form Shapes*, presented at EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, Annecy, 2008 (non publié).
- [Zan12] ZANNI, C., BERNHARDT, A. & CANI, M.-P. : *Surfaces Implicites Homothétiques*, presented at AFIG - 25èmes Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique, Calais, 2012 (non publié).
- [Lor87] LORENSEN, W. E. & CLINE, H. E. : Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *SIGGRAPH '87 Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive technique*, 163-169 (1987).
- [Blo87] BLOOMENTHAL, J. : *Polygonization of Implicit Surfaces*, presented at Xerox, 1987 (non publié).
- [Sta12] STAVA, O., VANEK, J. & BENES, B. : *Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects*, presented at SIGGRAPH 2012, Los Angeles, 2012 (non publié).
- [Men07] MENGES, A. : Computational morphogenesis. *Proceedings of the Third International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design (ASCAD)*, 725-744 (2007).
- [Lat89] LATHAM, W. : *Computers in art, design and animation* (1989), pp. 80-108.
- [Clu11a] CLUNE, J. & LIPSON, H. : *Evolving 3d objects with a generative encoding inspired by developmental biology*, presented at ACM SIGEVolution, 2011 (non publié).
- [Kni12] KNIPPERS, J. & SPECK, T. : Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspir. Biomim.* (2012).
- [Rey87] REYNOLDS, C. W. : *Herd, and schools: A distributed*, presented at SIGGRAPH '87 Proceedings, 1987 (non publié).
- [Kwo03] KWONG, H., 2003.
- [Abe81] ABELSON, H. & DISESSA, A. : *Turtle Geometry : The Computer As a Medium for Exploring Mathematics* (MIT Press, 1981).
- [Blo97] BLOOMENTHAL, J. & WYVILL, B. : *Introduction to Implicit Surfaces* (Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1997).
- [Dar59] DARWIN, C. R. : *The Origin of Species* (The Modern Library, published by Random House, New York, 1859).
- [Gol02] GOLDBERG, D. E. : *The design of innovation: Lessons from and for competent genetic algorithms* (Springer, 2002).
- [Gol89] GOLDBERG, D. E. : *Genetic Algorithm in search, optimization and machine learning* (Addison Wesley, 1989).
- [Hol75] HOLLAND, J. H. : *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (University of Michigan press, 1975).
- [Lee02] CIN-YOUNG, L. : *Efficient Automatic Engineering Design Synthesis via Evolutionary Exploration* (2002).
- [Neu66] VON NEUMANN, J. & BURKS, A. W. : *Theory of Self-Reproducing Automata* (1966).
- [RDa86] DAWKINS, R. : *The Blind Watchmaker* (WW Norton & Company, 1986).
- [Tod91] TODD, S. & LATHAM, W. : *Mutator: a subjective human interface for evolution of computer sculptures* (IBM United Kingdom Scientific Centre, 1991).
- [Vas02] VASSILAS, N. & MIAOULIS, G. : *Multicad-ga: A system for the design of 3d forms based on genetic algorithms and human evaluation* (<http://www.springerlink.com/index/3R5Q2M2RDBBQ521K.pdf>, 2002).