

Rapport de stage

Lev-Arcady SELLEM

Juin-Juillet 2017

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 2 |
| 2 | Méthodes de subdivision fractale | 4 |
| 2.1 | Contexte | 4 |
| 2.2 | Étude de l'influence du modèle utilisé pour le bruit | 4 |
| 2.3 | Résultats | 5 |
| 3 | Agrégation limitée par diffusion | 6 |
| 3.1 | Contexte | 6 |
| 3.2 | Génération d'un terrain à partir de son réseau hydrographique | 6 |
| 3.3 | Modification de l'algorithme de DLA | 7 |
| 3.4 | Résultats | 11 |
| 4 | Conclusion | 12 |
| | Références | 13 |

Table des figures

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Comparaison des deux méthodes de génération étudiées | 3 |
| 2 | Extraction de réseaux hydrographiques pour l'entraînement du réseau de neurones | 6 |
| 3 | Génération d'un terrain à partir de son réseau hydrographique | 7 |
| 4 | Principe du DLA | 7 |
| 5 | Influence de la géométrie de la grille sur un réseau produit par DLA | 8 |
| 6 | Génération d'un terrain à partir d'un DLA continu | 9 |
| 7 | Seuillage sur grille carrée | 10 |
| 8 | Seuillage sur grille hexagonale | 10 |
| 9 | Les lois empiriques de Horton : le nombre et la longueur moyenne des affluents suivent une loi exponentielle selon leur ordre. | 11 |
| 10 | Pseudo-dimension de deux réseaux hydrographiques, générés à partir des mêmes paramètres | 11 |

Ce stage a eu lieu du 1er juin au 21 juillet 2017 au sein de l'équipe GEOMOD du LIRIS (Lyon), sous la supervision d'Éric Guérin, enseignant-chercheur au LIRIS et au département informatique de l'INSA Lyon.

1 Introduction

Ce stage s'intéresse à la génération de terrains de synthèse, et à l'introduction de contrôle utilisateur dans le processus de génération. Le terrain joue en effet un rôle important, voire central, dans de nombreux domaines, comme les jeux vidéos, les simulateurs de vol, les effets spéciaux cinématographiques ou encore l'entraînement de logiciel destinés à opérer dans des zones non accessibles lors de leur développement (terrains de bataille, sol lunaire, etc.). Les techniques usuellement utilisées à ce but sont au nombre de trois : l'édition interactive, la simulation physique et la génération procédurale.

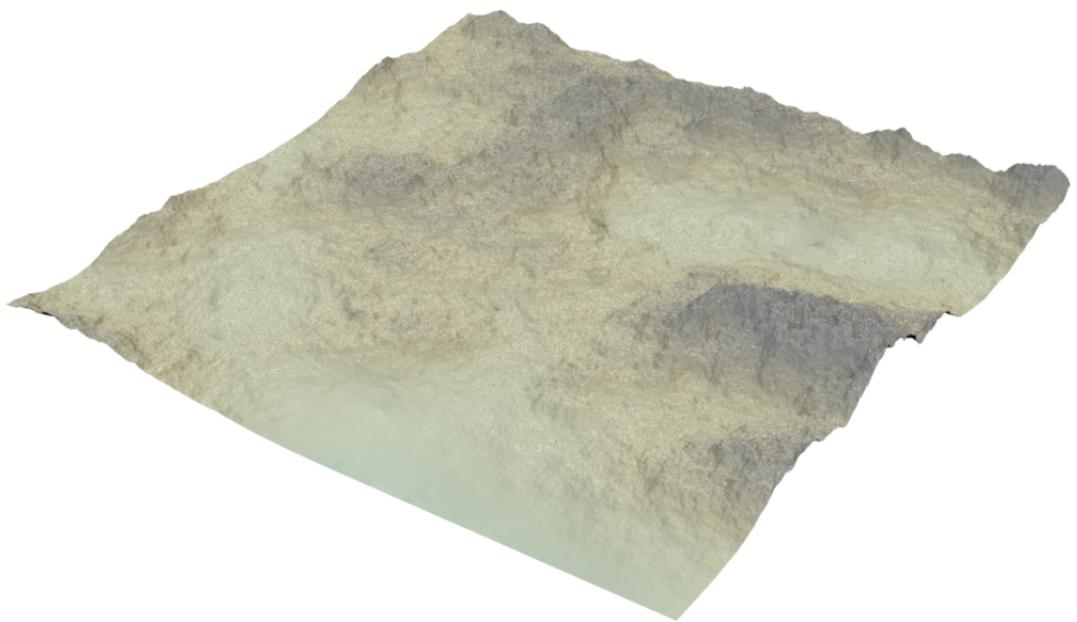
L'édition interactive regroupe les différentes méthodes permettant à un utilisateur d'imposer, ou tout du moins de contrôler le rendu final. ZHOU et al. [16] permettent de choisir les caractéristiques d'un terrain en le générant à partir d'une base d'exemples. Cette approche permet donc un haut niveau de détail, mais nécessite que l'utilisateur dispose déjà de terrains avec les caractéristiques qu'il désire. Dans une approche plus ouverte, GAIN, MARAIS et STRA [17], GÉNEVAUX et al. [22] et HNAIDI et al. [19] ont mis au point des méthodes permettant de générer un terrain en dessinant ses traits caractéristiques : lits de rivières, lignes de crêtes, dunes, etc. Ces méthodes offrent un contrôle avancé à l'utilisateur, mais ne garantissent pas la crédibilité du terrain obtenu, puisqu'elles n'imposent aucun modèle sur l'emplacement de ces différents éléments ; tout repose donc uniquement sur l'intuition de l'artiste.

La simulation physique repose sur la modélisation des phénomènes qui façonnent les terrains : érosion, tectonique des plaques, interactions avec la végétation, la faune, etc. MUSGRAVE, KOLB et MACE [8] ont par exemple introduit un modèle simple pour l'érosion et la sédimentation ; les développements récents de ces techniques, qui tirent notamment profit du calcul sur GPU (VANEK et al. [20]), permettent d'obtenir des terrains morphologiquement convaincants ou d'anticiper l'évolution de terrains réels. Toutefois, ces techniques restent malgré tout très exigeantes en ressources ; elles ne sont donc pas adaptées aux applications qui requièrent une génération rapide ou des terrains à la fois étendus et hautement détaillés. De plus, l'utilisateur n'a aucun contrôle sur le processus de simulation, une fois le terrain initial défini.

La génération procédurale, enfin, vise à exploiter des processus aléatoires pour générer automatiquement de grandes quantités de données. Citons notamment les méthodes basées sur des subdivisions fractales, telles que présentées par FOURNIER, FUSSELL et CARPENTER [3] et MILLER [6] : elles permettent une génération rapide, à un niveau de détail aussi fin que désiré. D'autres méthodes oeuvrent directement dans le domaine fréquentiel : PERLIN [4] génère par exemple des terrains en sommant des bruits à différentes fréquences. Les terrains générés par ces méthodes privent également l'utilisateur de tout contrôle sur l'emplacement de leurs traits caractéristiques. De plus, elles permettent rarement de rendre compte des phénomènes d'érosion : les terrains générés ont l'air géologiquement neuf, notamment parce que leurs caractéristiques sont les mêmes partout.

Les terrains de synthèse sont donc soit entièrement dessinés par un artiste, ce qui limite la taille et la complexité des terrains produits en temps raisonnable mais donne un contrôle total à l'utilisateur, soit au contraire générés automatiquement mais en supprimant largement la possibilité de contrôler l'aspect général du terrain obtenu (simulation physique) et en perdant en réalisme (génération procédurale). Les recherches actuellement menées au sein de l'équipe GEOMOD du LIRIS ont pour but de profiter de l'accélération permise par la génération procédurale, tout en laissant la possibilité d'imposer des contraintes au terrain obtenu.

Deux pistes différentes ont été explorées dans ce but : la modification de méthodes de subdivision fractale (notamment celle appelée Diamond-Square), et la reconstruction de terrains à partir d'un réseau hydrographique généré par un processus d'aggrégation limitée par diffusion (DLA).



(a) Diamond-Square



(b) DLA

FIGURE 1 – Comparaison des deux méthodes de génération étudiées

2 Méthodes de subdivision fractale

2.1 Contexte

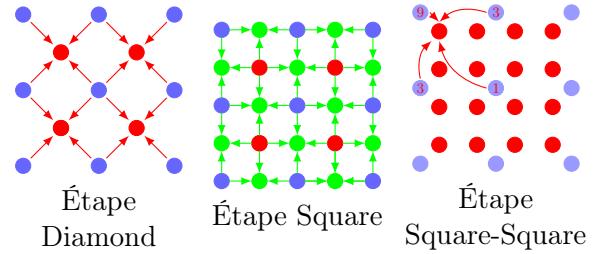
Les méthodes de subdivision fractale exploitent le fait que les terrains réels possèdent des propriétés statistiques d'autosimilarité, c'est-à-dire que, sans être complètement autosimilaires comme peuvent l'être le flocon de Von Koch ou le triangle de Sierpinski, leur surface (et leur frontière) ne sont pas de dimension entière [2]. Pour exploiter cette propriété, Miller [6] a proposé trois schémas de subdivision fractale permettant de créer un terrain récursivement à partir d'un faible nombre de points de départ : les subdivisions Triangle-Edge, Diamond-Square et Square-Square. La première souffrant d'artefacts trop visibles, nous n'avons utilisées que les deux dernières dans la suite.

Ces deux méthodes représentent les terrains sous forme de *cartes de hauteur* : à chaque point d'une matrice, on associe une altitude, créant ainsi une surface. Cette méthode est bien entendu réductrice : on ne peut ainsi pas créer de cavité, surplomb, caves, etc. Elle donne néanmoins un rendu visuel satisfaisant, et est donc largement utilisée. Qui plus est, elle permet une comparaison facile avec des terrains réels, pour lesquels il existe de grandes bases de cartes de hauteur (notamment celle de l'USGS¹). Le principe général pour enrichir une carte de hauteur est d'ajouter des points en leur assignant le barycentre de leurs voisins connus plus un bruit aléatoire ; les méthodes se distinguent principalement par le choix des voisins.

La méthode Diamond-Square part d'une carte de côté $2^0 + 1 = 2$, et passe par deux étapes pour enrichir une carte de côté $2^n + 1$ en une carte de côté $2^{n+1} + 1$: on commence par ajouter un point au centre de chaque carré (étape Diamond), puis au milieu de chaque arête (étape Square). Les voisins considérés sont toujours les quatre plus proches. Cette méthode est donc interpolante, c'est-à-dire qu'aucun point n'est supprimé au cours de la génération.

La méthode Square-Square part d'une carte de côté $2^2 - 1 = 3$, et enrichit une carte de côté $2^n - 1$ en une carte de côté $2^{n+1} - 1$ en créant, à l'intérieur de chaque carré, un carré de même centre et de côté moitié. Les sommets de ce nouveau carré prennent pour hauteur le barycentre des hauteurs du carré initial, pondérées, du sommet le plus

proche au sommet le plus éloigné, des coefficients 9,3,3 et 1. Le carré initial n'est pas conservé ; cette méthode n'est donc pas interpolante.



L'équipe GEOMOD disposait déjà d'un outil de génération de terrain selon une méthode Diamond-Square améliorée, permettant de modifier le terrain créé pour lui ajouter des crêtes et des creux à la volée. Lors du stage, cet outil a été étendu pour permettre l'utilisation de la méthode Square-Square.

2.2 Étude de l'influence du modèle utilisé pour le bruit

Dans la littérature sur la méthode Diamond-Square, la perturbation aléatoire à ajouter à un point par rapport au barycentre de ses voisins suit toujours une loi uniforme centrée, dont l'amplitude décroît avec le niveau de subdivision [24]. Typiquement, on partira d'une amplitude valant la moitié de la largeur du terrain à générer, et on la divisera d'un facteur $1 < r < 2$ à chaque pas. Nous avons cherché à mesurer le gain en réalisme que l'on peut espérer en changeant cette loi uniforme.

Pour cela, nous sommes partis de cartes de hauteurs de terrains réels (à partir de la base de l'USGS) et, pour chaque terrain, nous avons étudié l'écart entre les altitudes réelles et les altitudes qui auraient été obtenues en appliquant l'algorithme du Diamond-Square sans perturbation au même terrain sous-échantillonné : pour un point donné, son altitude réelle est donc comparée au barycentre de celles des voisins considérés par le Diamond-Square. En traçant alors la répartition de cet écart, il apparaît qu'une loi de densité décroissant de manière biquadratique semble bien correspondre aux valeurs mesurées, et ce pas seulement aux premiers niveaux de subdivision, qui souffrent également du bruit inhérent aux instruments de mesures utilisées pour créer les cartes de hauteur.

Nous avons donc modifié l'algorithme du Diamond-Square pour utiliser la loi $x \mapsto \frac{\sqrt{2}/\pi}{1+x^4}$ (échantillonnée par une méthode de réjection) ; nous avons également utilisée une loi normale centrée réduite, à titre de comparaison.

1. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

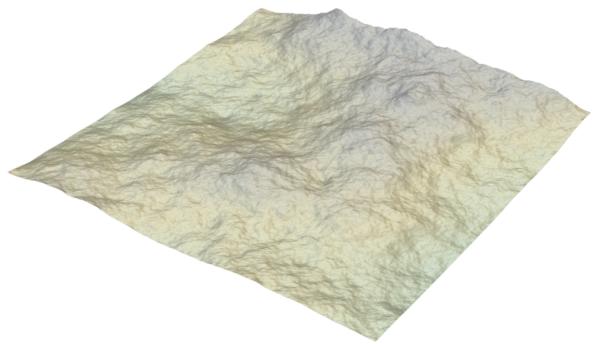
D'autre part, en nous inspirant d'une méthode grossière de simulation d'érosion, nous avons imposé que l'amplitude du bruit ne décroisse plus seulement en fonction du niveau de subdivision, mais également en fonction de l'altitude du point auquel elle s'applique. Cette modification vise à ce que le relief soit d'autant plus escarpé que le point considéré est haut - ceci donne un effet de montagnes et de plaines. À cette fin, le bruit ajouté à un point donné est désormais multiplié par le barycentre de l'altitude de ses voisins.

2.3 Résultats

La modification de la loi suivie par le bruit aléatoire n'impacte pas suffisamment les terrains obtenus pour que l'on puisse ne serait-ce que déterminer visuellement quels terrains ont été obtenus avec une loi uniforme ou une loi gaussienne/biquadratique. En revanche, avec la méthode Diamond-Square, choisir une loi à support infini accentue les artefacts visuels connus (creux et pics trop pointus [6]). Le nombre de points interpolés est en effet suffisant pour que des valeurs extrêmes apparaissent régulièrement (typiquement, plusieurs millions d'échantillons sont tirés pour créer un terrain). Cette piste a donc été abandonnée.

Qui plus est, lier l'amplitude du bruit à l'altitude du point bruité fournit au contraire un rendu plus crédible que le Diamond-Square normal, indiquant que la loi de décroissance du bruit joue un rôle bien plus important que son profil exact. Pour un bruit ne dépendant que du degré de subdivision, on sait lier le coefficient de décroissance r à la dimension fractale du terrain obtenu [24], [7] ; l'ajout de cette nouvelle dépendance permet donc de créer un terrain dont la dimension fractale varie spatialement.

Malgré tout, la nature même des algorithmes de subdivision fractale empêche l'apparition de caractéristiques telles que les rivières et les lignes de crêtes, du fait du lissage opéré par les calculs de barycentres ; le stage s'est donc tourné vers la génération de terrains à partir de ces détails caractéristiques.



(a) Diamond-Square uniforme



(b) Amplitude pondérée par la hauteur

3 Agrégation limitée par diffusion

3.1 Contexte

FARÈS BELHADJ [14] a proposé un algorithme de construction d'un terrain à partir d'un réseau de rivières et d'un réseau de crêtes ; son algorithme s'appuie sur une méthode de subdivision fractale interpolante (Triangle-Edge ou Diamond-Square) modifiée pour respecter le réseau de contraintes. Il propose dans cet algorithme une phase de remontée des contraintes, censée éviter les artefacts visuels lors du processus de subdivision. Cependant, ses rivières et crêtes suivent des marches aléatoires, ce qui donne un terrain peu crédible ; de plus, en implémentant son algorithme de reconstruction avec la méthode Diamond-Square sur un réseau de contraintes dessiné manuellement, il apparaît que cette phase de remontée n'atteint pas son objectif.

HNAIDI et al. [19], GÉNEVAUX et al. [21] et GÉNEVAUX et al. [22] ont mis au point des méthodes procédurales de génération de terrains offrant un contrôle sur les traits caractéristiques (rivières, crêtes, lacs, plateaux, etc.).

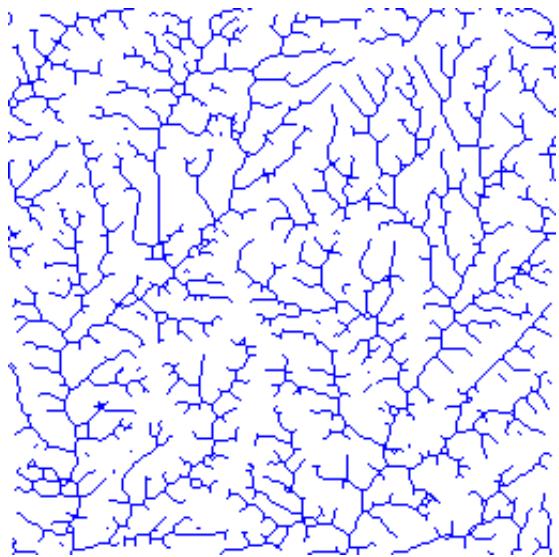
JEFFREY G. MASEK [10] et HIROSHI KONDOW [5] ont proposé un modèle d'agrégation limitée par diffusion afin de générer les réseaux hydrographiques. En se basant sur les travaux de HORTON [1], ils montrent que ce modèle produit des réseaux partageant les mêmes propriétés fractales que les réseaux réels. C'est cette dernière approche que nous cherchons à développer ici, en nous concentrant donc uniquement sur les réseaux hydrographiques.

3.2 Génération d'un terrain à partir de son réseau hydrographique

En utilisant une approche en cours de développement au sein de l'équipe GEOMOD, un réseau de neurones a été entraîné pour produire un terrain à partir de son réseau hydrographique. Les données d'entraînement proviennent de cartes de hauteurs de terrains réels, issues de bases de données publiques. On en extrait le réseau hydrographique en simulant un écoulement d'eau sur tout le terrain puis en extrayant les zones d'accumulation (figure 2). Le terrain en assez basse définition produit par le réseau de neurones est alors enrichi par la technique d'amplification mise au point par GUÉRIN et al. [23], qui permet d'augmenter la résolution d'un terrain en lui ajoutant des détails issus de terrains réels (figure 3).



(a) Terrain réel (vue de haut)



(b) Réseau hydrographique extrait

FIGURE 2 – Extraction de réseaux hydrographiques pour l'entraînement du réseau de neurones

3.3 Modification de l'algorithme de DLA

L'algorithme de DLA utilisé par JEFFREY G. MASEK [10] consiste à placer des graines sur une grille carrée, puis à lancer une par une des particules sur la grille. Chaque particule effectue une marche aléatoire sur la grille, en se déplaçant verticalement ou horizontalement seulement, jusqu'à soit sortir de la grille, soit arriver dans le voisinage d'une graine. Dans ce dernier cas, elle devient une graine à son tour s'il n'y a qu'une seule autre graine parmi ses quatre voisins, et disparaît sinon.

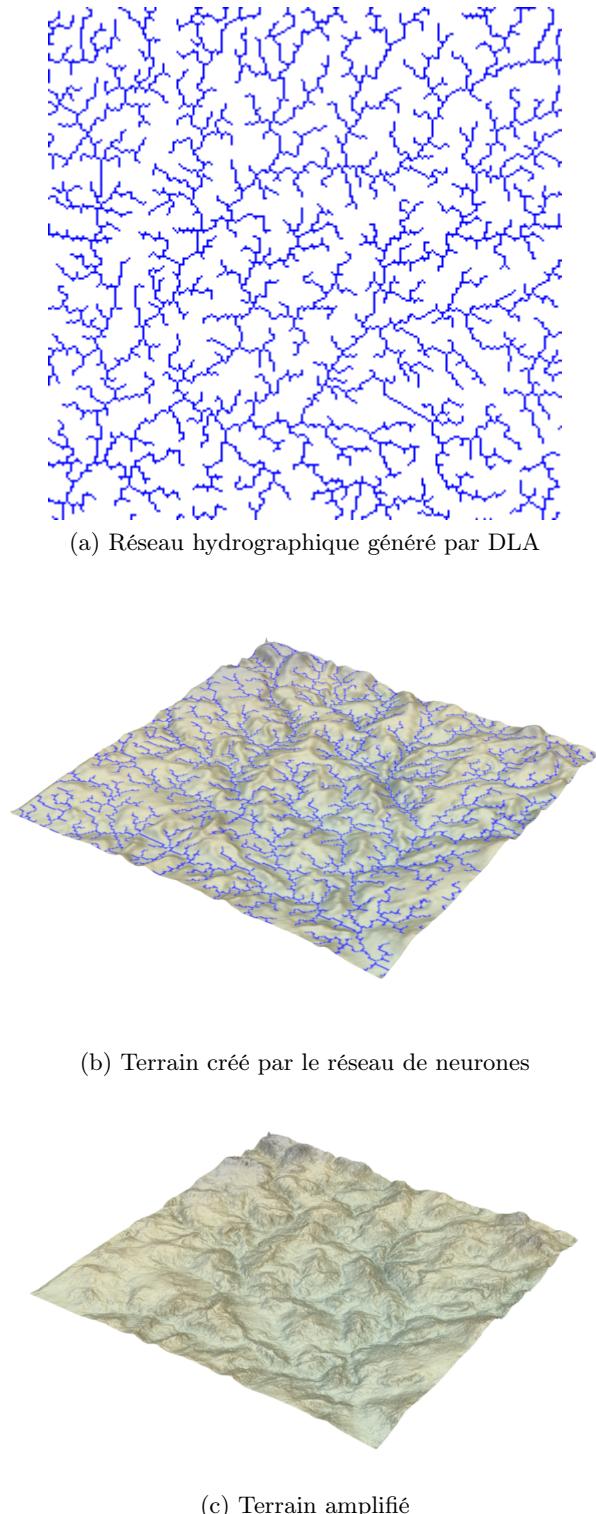


FIGURE 3 – Génération d'un terrain à partir de son réseau hydrographique

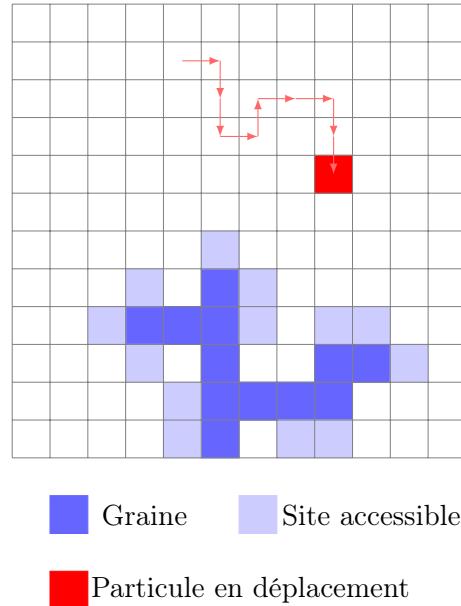


FIGURE 4 – Principe du DLA

Tel quel, le processus de DLA produit un réseau très compact ; JEFFREY G. MASEK [10] force le réseau à s'étendre en imposant à chaque particule pouvant devenir une graine une probabilité dépendant de l'encombrement local autour d'elle. Au contraire, nous avons cherché à explorer l'influence de la géométrie de la grille sur laquelle se déroule le DLA, sans introduire de probabilité d'accrétion dépendant de l'encombrement.

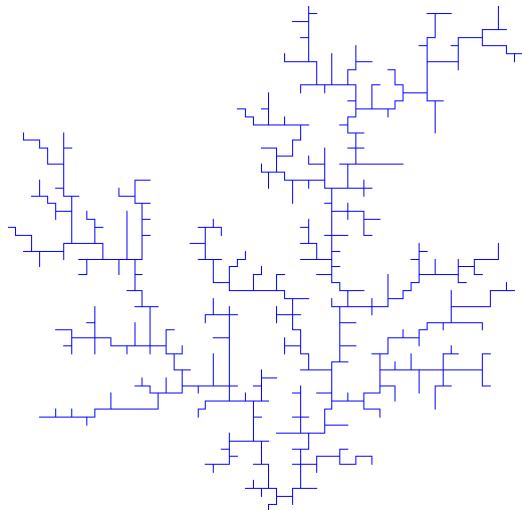
Le réseau de base, carré avec quatre voisins par site, permet en effet à une graine d'avoir jusqu'à quatre autres graines voisines ; passer à huit voisins par site abaisse ce nombre à trois. Toutefois, ce choix brise la symétrie entre les différents voisins, puisqu'ils ne sont plus tous à même distance : quatre sont proches et sont voisins par une arête, les quatre autres sont lointains et voisins par un sommet seulement. Pour cette raison, nous avons préféré introduire un maillage hexagonal du terrain, qui permet également jusqu'à trois voisins par graine, mais ne favorise aucune direction.

La figure 5 montre la différence entre un DLA sur grille carrée et sur grille hexagonale, pour une graine initiale unique sur le bord inférieur du terrain, et après avoir lâché 6000 particules. On y voit l'effet de la grille hexagonale : sans aucune contrainte dépendant de l'encombrement local, le réseau obtenu est plus élancé, et les branches ne sont plus couvertes systématiquement de courtes ramifications. Ceci correspond au fait qu'un motif "en croix", possible sur la grille carrée, ne l'est plus sur la grille hexagonale.

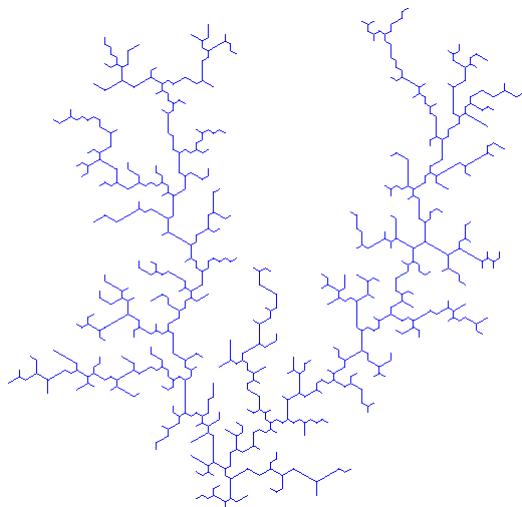
Nous introduisons également une nouvelle méthode pour générer des réseaux élancés : usuellement, on réalise un DLA avec relativement peu de particules, afin que le réseau obtenu forme quelques ramifications identifiables - un trop grand nombre de particules recouvrirait entièrement le terrain. Le désavantage de cette méthode est que le réseau obtenu ne passe que par un nombre réduit de sites (carrés ou hexagonaux) ; la géométrie sous-jacente est donc particulièrement visible, et les ramifications ont des tracés simples.

Or, nous cherchons ici à pouvoir créer des formes complexes, en s'affranchissant donc du nombre réduit d'angles permis par la grille choisie (90° et 180° sur grille carrée, 60° , 120° et 180° sur grille hexagonale). Pour cela, le réseau doit recouvrir des zones suffisamment étendues pour que la taille des éléments de la grille devienne négligeable.

À cette fin, nous avons donc généré des DLA sur des grilles étendues et avec un nombre de particules suffisant pour complètement saturer le terrain. Afin d'en extraire des ramifications visuellement identifiables, nous avons ensuite exploité la structure arborescente du réseau obtenu : chaque particule se transformant en graine prend pour mère l'unique graine dans son voisinage. Ce choix nous permet de colorer le réseau en associant à chaque graine son nombre d'Horton-Strahler² ; ce nombre a notamment été utilisé par HORTON [1] pour quantifier l'importance d'un affluent dans un réseau hydrographique. En éliminant toutes les graines de degré inférieur à un certain seuil, on contrôle alors la densité du réseau tout en conservant sa complexité géométrique, les hauts degrés formant de longue ramifications (figures 7 et 8).



(a) Grille carrée



(b) Grille hexagonale

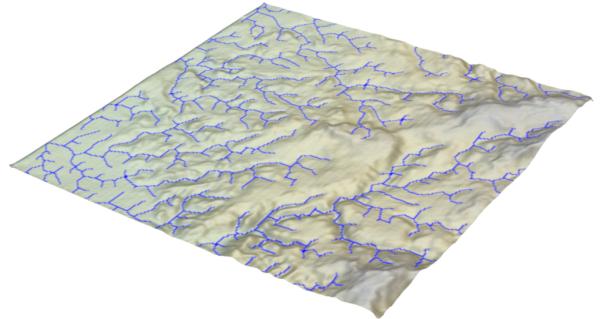
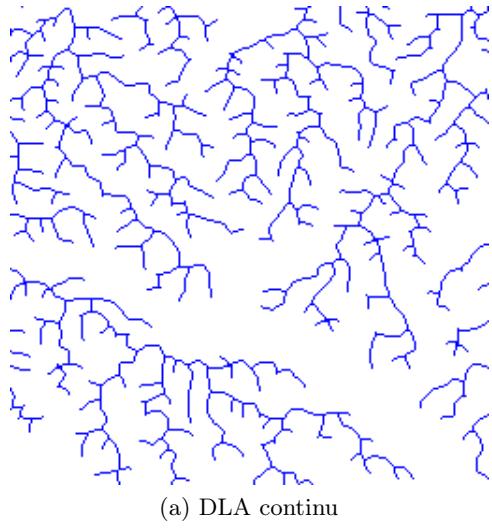
FIGURE 5 – Influence de la géométrie de la grille sur un réseau produit par DLA

2. https://en.wikipedia.org/wiki/Strahler_number

Une autre piste permettant de générer des réseaux dont les ramifications peuvent former un angle quelconque est d'effectuer l'algorithme du DLA sur un terrain continu au lieu d'une grille discrète. Les particules se déplacent alors d'une distance donnée à chaque étape, l'angle étant tiré aléatoirement. Elles peuvent se transformer en graine lorsqu'elle arrivent à une distance fixée d'une autre graine. La figure 6 montre un exemple généré à partir d'un tel algorithme. L'avantage de cette méthode est qu'elle nécessite beaucoup moins de particules que la précédente pour obtenir un résultat convenable. Cependant, cet avantage est contrecarré par le fait que les collisions, qui étaient détectées en temps constant sur une grille, sont désormais très coûteuses à calculer (en temps quadratique sur le nombre de graines avec une implémentation naïve, améliorable avec une structure de type 'loose-grid' au détriment de l'espace consommé). Dans les faits, cette méthode n'est pas plus rapide ; seul le gain en réalisme du réseau est appréciable.

Pour obtenir le même gain en conservant la vitesse du calcul sur grille, deux approches ont été envisagées. La première consiste à précalculer une grille dont les arêtes forment des angles quelconques : afin de la répartir uniformément, on tire les sommets selon un échantillonage de disques de Poisson, puis on forme les arêtes en effectuant une triangulation de Delaunay. Cependant, la phase d'échantillonage nécessite les mêmes tests de collision que la méthode précédente : il n'y a donc pas de gain de temps à espérer.

Pour contourner ce problème, on peut ensuite envisager d'utiliser un échantillonage de disques de poisson réduit, pavant ensuite le plan. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps d'approfondir cette voie.

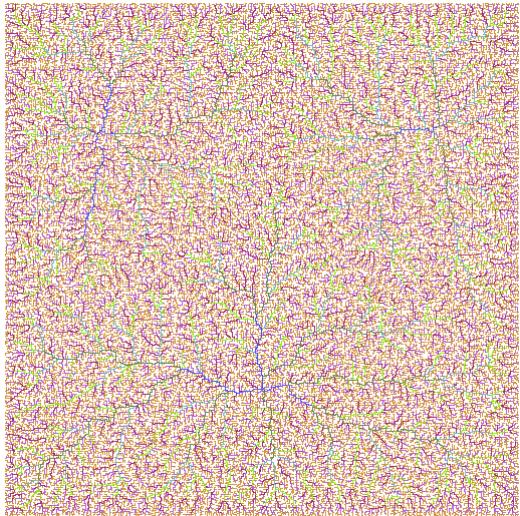


(b) Terrain créé par le réseau de neurones

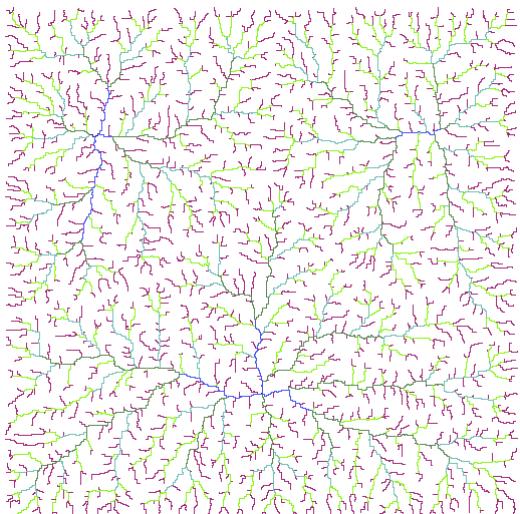


(c) Terrain amplifié

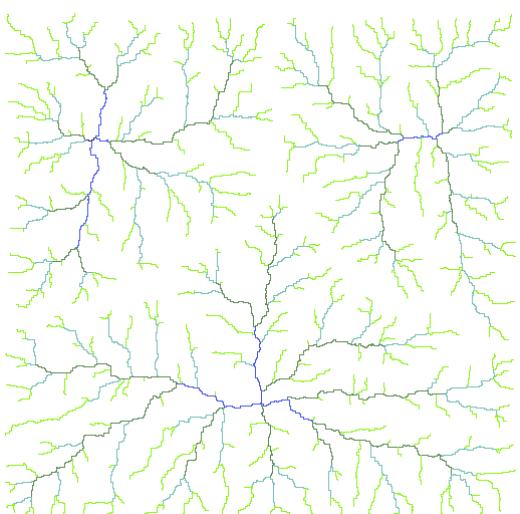
FIGURE 6 – Génération d'un terrain à partir d'un DLA continu



(a) Seuil=1

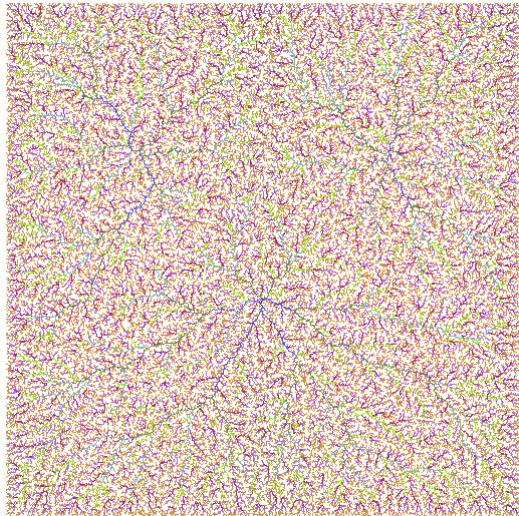


(b) Seuil=3

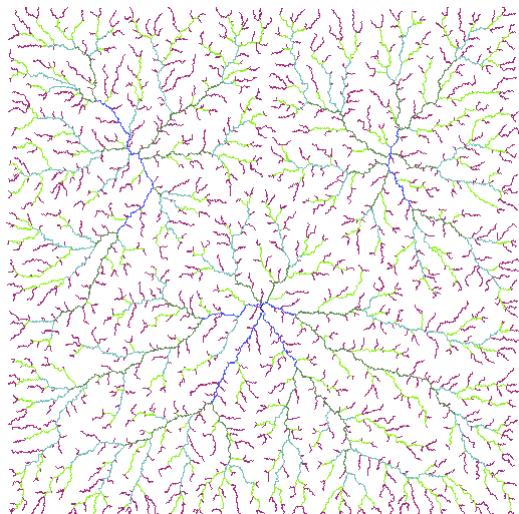


(c) Seuil=4

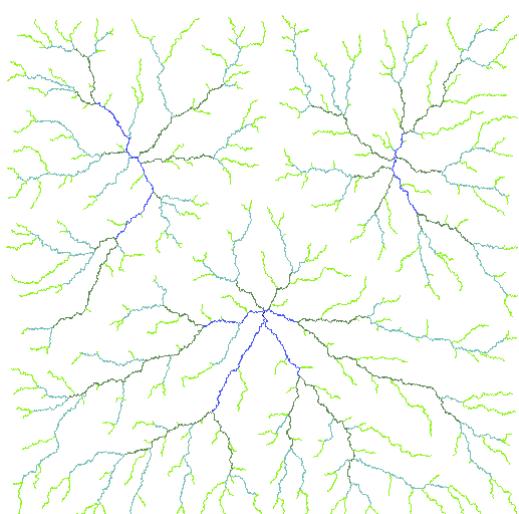
FIGURE 7 – Seuillage sur grille carrée



(a) Seuil=1



(b) Seuil=3



(c) Seuil=4

FIGURE 8 – Seuillage sur grille hexagonale

3.4 Résultats

Nous manquons d'outils quantitatifs pour qualifier la qualité d'un terrain ou d'un réseau hydrographique.

JEFFREY G. MASEK [10] propose une définition de la dimension fractale d'un réseau hydrographique reposant sur l'évolution de la longueur moyenne d'une ramifications en fonction de son ordre de Horton-Strahler ; il note que sa version modifiée de l'algorithme du DLA produit des réseaux avec une dimension proche de la plage $1.80 - 1.85$ observée sur les relevés de HORTON [1].

$$N(w) = R_b^w + C_N$$

$$L(w) = R_l^{-w} + C_L$$

$$D = \frac{R_b}{R_l}$$

FIGURE 9 – Les lois empiriques de Horton : le nombre et la longueur moyenne des affluents suivent une loi exponentielle selon leur ordre.

Toutefois, en appliquant sa mesure aux réseaux générés par notre méthode, il s'avère qu'elle ne saurait être interprétée comme une dimension fractale, car aucun argument théorique ne permet de borner sa valeur *a priori*. En pratique, nous avons observé des valeurs entre 1.8 et 6.5 sur certains réseaux. LIU [9] exhibe d'ailleurs des réseaux hydrographiques réels prenant des valeurs entre 1.12 et 2.05 avec cette mesure, ce qui met en défaut le postulat de JEFFREY G. MASEK [10].

Qui plus est, à défaut d'être égale à la dimension fractale, elle ne semble même pas y être liée : la figure 10 montre deux réseaux, générés avec les mêmes paramètres, l'un mesuré à 1.85 (soit dans la plage visée par Masek) et l'autre à 2.87, leurs dimension fractale étant par ailleurs sensiblement similaires. Il paraît donc abusif d'utiliser cet outil pour évaluer la qualité d'un réseau.

Qualitativement, notre méthode produit des terrains visuellement satisfaisant (figure 3). Contrairement aux terrains générés par les méthodes de subdivision fractale, ils contiennent notamment des lits de rivières et des lignes de crêtes. Cependant, l'utilisation d'un réseau de neurones réduit le contrôle que l'utilisateur peut avoir sur le résultat final : toutes les ramifications du réseau hydrographique sont traitées en entrée de la même manière (traits bleus de 1px sur fond noir), empêchant de choisir entre large fleuve ou rigole. En

revanche, on peut agir sur la zone recouverte par le réseau que produit le DLA en ajoutant des directions de croissance privilégiées : au moment où une particule peut devenir une graine, on introduit une probabilité qu'elle le devienne effectivement. Cette probabilité dépend du produit scalaire entre la nouvelle arête que cela créerait et la direction à privilégié.

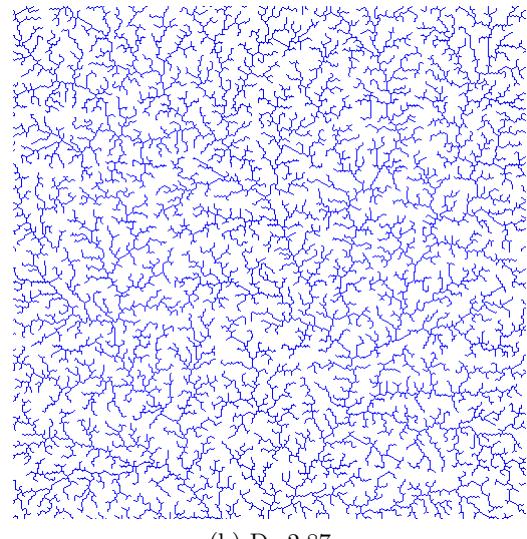
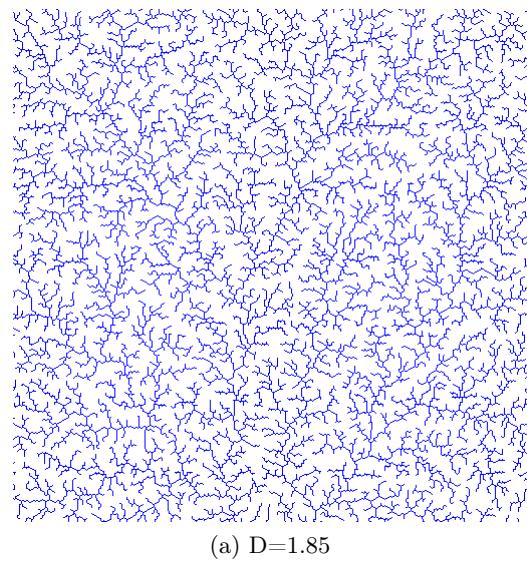


FIGURE 10 – Pseudo-dimension de deux réseaux hydrographiques, générés à partir des mêmes paramètres

4 Conclusion

Durant ce stage, nous avons donc montré que la piste initialement explorée par l'équipe GEOMOD sur la méthode DiamondSquare menait à une impasse, et nous avons améliorée une technique existante de génération de réseaux hydrographiques à partir de DLA, couplée à une technique nouvelle de génération de terrains à partir de leurs réseaux hydrographiques. Il serait intéressant de voir si cette méthode s'étend à d'autres structures étudiées pour leur rapport aux réseaux hydrographiques réels ; les L-systèmes stochastiques et les RRT (rapidly exploring random tree) sont de bons candidats.

L'application de contraintes probabilistes à un DLA sur grille continue a fourni des résultats prometteurs pour ce qui est de donner une direction de croissance privilégiée au réseau obtenu. Il reste à voir si ce résultat peut se généraliser à une carte de contraintes, permettant un contrôle local du sens d'écoulement désiré, tout en maintenant une apparence similaire à un réseau hydrographique réel.

Toutefois, notre méthode repose sur l'utilisation d'un réseau de neurones, qui limite donc le contrôle utilisateur à une gestion globale de la répartition des caractéristiques du terrain, l'empêchant de spécifier des contraintes très spécifiques ; en particulier, il ne peut imposer, pour un écoulement donné, s'il sera traité comme important ou faible par le réseau, ce qui reste très limitant. Il reste de plus à prendre en compte des structures qui ne peuvent pas être représentées dans la structure arborescente, plutôt adaptée aux rivières : océans, lac, etc.

Enfin, la mise au point d'outils de mesure quantitatifs reste une question largement ouverte dans ce domaine.

Je remercie toute l'équipe GEOMOD pour son accueil chaleureux durant toute la durée de mon stage, et tout particulièrement Éric GUÉRIN pour son encadrement et sa capacité à me suggérer continuellement de nouvelles pistes, et Éric GALIN pour ses conseils avisés.

Références

- [1] Robert E HORTON. « Erosional development of streams and their drainage basins ; hydrophysical approach to quantitative morphology ». In : *GSA Bulletin* 56.3 (1945), p. 275. DOI : [10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2). URL : [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2).
- [2] Benoît MANDELBROT. « How Long Is the Coast of Britain ? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension ». In : *Science* 156.3775 (mai 1967), p. 636–638. ISSN : 0036-8075. DOI : [10.1126/science.156.3775.636](https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636). URL : <http://science.sciencemag.org/content/156/3775/636/tab-article-info>.
- [3] Alain FOURNIER, Don FUSSELL et Loren CARPENTER. « Computer Rendering of Stochastic Models ». In : *Commun. ACM* 25.6 (juin 1982), p. 371–384. ISSN : 0001-0782. DOI : [10.1145/358523.358553](https://doi.acm.org/10.1145/358523.358553). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/358523.358553>.
- [4] Ken PERLIN. « An Image Synthesizer ». In : *SIGGRAPH Comput. Graph.* 19.3 (juil. 1985), p. 287–296. ISSN : 0097-8930. DOI : [10.1145/325165.325247](https://doi.acm.org/10.1145/325165.325247). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/325165.325247>.
- [5] Mitsugu Matsushita HIROSHI KONDOH. « Diffusion-Limited Aggregation with Anisotropic Sticking Probability : A Tentative Model for River Networks ». In : *Journal of the Physical Society of Japan* 55.10 (1986), p. 3289–3292. DOI : [10.1143/JPSJ.55.3289](https://doi.org/10.1143/JPSJ.55.3289).
- [6] Gavin S P MILLER. « The Definition and Rendering of Terrain Maps ». In : *SIGGRAPH Comput. Graph.* 20.4 (août 1986), p. 39–48. ISSN : 0097-8930. DOI : [10.1145/15886.15890](https://doi.acm.org/10.1145/15886.15890). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/15886.15890>.
- [7] *The science of fractal images*. 1^{re} éd. Springer-Verlag, 1988. ISBN : 0387966080, 9780387966083.
- [8] F. K. MUSGRAVE, C. E. KOLB et R. S. MACE. « The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains ». In : *SIGGRAPH Comput. Graph.* 23.3 (juil. 1989), p. 41–50. ISSN : 0097-8930. DOI : [10.1145/74334.74337](https://doi.org/10.1145/74334.74337).

- [9] Tanzhuo LIU. « Fractal structure and properties of stream networks ». In : *Water Resources Research* 28.11 (1992), p. 2981–2988. ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/92WR01516](https://doi.org/10.1029/92WR01516). URL : <http://dx.doi.org/10.1029/92WR01516>.
- [10] Donald L. Turcotte JEFFREY G. MASEK. « A diffusion-limited aggregation model for the evolution of drainage networks ». In : *Earth and Planetary Science Letters* 119.3 (1993), p. 379–386. ISSN : 0012-821X. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(93\)90145-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(93)90145-Y). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012821X9390145Y>.
- [11] Forest Kenton MUSGRAVE. « Methods for Realistic Landscape Imaging ». UMI Order No. GAX94-15872. Thèse de doct. New Haven, CT, USA, 1993.
- [12] T. C. HALSEY. « The branching structure of diffusion-limited aggregates ». In : *EPL (Europhysics Letters)* 39.1 (1997), p. 43. URL : <http://stacks.iop.org/0295-5075/39/i=1/a=043>.
- [13] S. G. DE BARTOLO, S. GABRIELE et R. GAUDIO. « Multifractal behaviour of river networks ». In : *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4.1 (2000), p. 105–112. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00304514>.
- [14] Pierre Audibert FARÈS BELHADJ. « Modeling Landscapes with Ridges and Rivers : Bottom Up Approach ». In : *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*. GRA-PHITE '05. Dunedin, New Zealand : ACM, 2005, p. 447–450. ISBN : 1-59593-201-1. DOI : [10.1145/1101389.1101479](https://doi.org/10.1145/1101389.1101479).
- [15] Farès BELHADJ. « Terrain Modeling : A Constrained Fractal Model ». In : *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*. AFRIGRAPH '07. Grahamstown, South Africa : ACM, 2007, p. 197–204. ISBN : 978-1-59593-906-7. DOI : [10.1145/1294685.1294717](https://doi.org/10.1145/1294685.1294717). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1294685.1294717>.
- [16] Howard ZHOU et al. « Terrain Synthesis from Digital Elevation Models ». In : 13 (août 2007), p. 834–48.
- [17] James GAIN, Patrick MARAIS et Wolfgang STRA. « Terrain Sketching ». In : *Proceedings of the 2009 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. I3D '09. Boston, Massachusetts : ACM, 2009, p. 31–38. ISBN : 978-1-60558-429-4. DOI : [10.1145/1507149.1507155](https://doi.org/10.1145/1507149.1507155).
- [18] Houssam HNAIDI, Eric GUÉRIN et Samir AKKOUCH. « Multiresolution control of curves and surfaces with a self-similar model ». In : *Fractals*. 3^e sér. 18 (sept. 2010), p. 271–286. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01381459>.
- [19] Houssam HNAIDI et al. « Feature based terrain generation using diffusion equation ». en. In : *Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics)* 29.7 (2010), p. 2179–2186.
- [20] J. VANEK et al. « Large-Scale Physics-Based Terrain Editing Using Adaptive Tiles on the GPU ». In : *IEEE Computer Graphics and Applications* 31.6 (nov. 2011), p. 35–44. ISSN : 0272-1716. DOI : [10.1109/MCG.2011.66](https://doi.org/10.1109/MCG.2011.66).
- [21] Jean-David GÉNEVAUX et al. « Terrain Generation Using Procedural Models Based on Hydrology ». In : *ACM Trans. Graph.* 32.4 (juil. 2013), 143 :1–143 :13. ISSN : 0730-0301. DOI : [10.1145/2461912.2461996](https://doi.org/10.1145/2461912.2461996). URL : [http://doi.acm.org/10.1145/2461912.2461996](https://doi.acm.org/10.1145/2461912.2461996).
- [22] Jean-David GÉNEVAUX et al. « Terrain Modelling from Feature Primitives ». In : *Computer Graphics Forum* 34.6 (mai 2015), p. 198–210. DOI : [10.1111/cgf.12530](https://doi.org/10.1111/cgf.12530). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01257198>.
- [23] Eric GUÉRIN et al. « Sparse representation of terrains for procedural modeling ». In : *Computer Graphics Forum (proceedings of Eurographics 2016)* 35.2 (2016), p. 177–187. ISSN : 1467-8659. DOI : [10.1111/cgf.12821](https://doi.org/10.1111/cgf.12821). URL : [http://dx.doi.org/10.1111/cgf.12821](https://doi.org/10.1111/cgf.12821).
- [24] Ivo MARÁK. *On Synthetic Terrain Erosion Modeling :A Survey*. URL : <http://old.cescg.org/CESCG97/marak/node3.html#SECTION00021000000000000000> (visité le 27/07/2017).