



HAL
open science

Représentation, modélisation et génération procédurale de paysages de rivières naturelles

Thibault Dupont

► **To cite this version:**

Thibault Dupont. Représentation, modélisation et génération procédurale de paysages de rivières naturelles. Modélisation et simulation. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSE1302 . tel-03281195

HAL Id: tel-03281195

<https://theses.hal.science/tel-03281195>

Submitted on 8 Jul 2021

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

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



N° d'ordre NNT : 2019LYSE1302

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

opérée au sein de

l'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale ED512

InfoMaths

Spécialité de doctorat : Informatique

Soutenue publiquement le 11/12/2019 par :

Thibault Jean Roger DUPONT

**Représentation, modélisation et génération
procédurale de paysages de rivières naturelles**

Devant le jury composé de :

M. Venceslas BIRI , Professeur des Universités, Université Paris-Est-Marne-La-Vallée,	Rapporteur
M. Jean-Michel DISCHLER , Professeur des Universités, Université de Strasbourg,	Rapporteur
Mme. Saida BOUAKAZ , Professeure des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1,	Examinatrice
Mme. Emmanuelle DARLES , Maître de Conférences, Université de Poitiers,	Examinatrice
M. Éric GALIN , Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1,	Directeur de thèse
M. Adrien PEYTAVIE , Maître de Conférences, Université Claude Bernard Lyon 1,	Co-Directeur de thèse

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université

Président du Conseil Académique

Vice-président du Conseil d'Administration

Vice-président du Conseil Formation et Vie Universitaire

Vice-président de la Commission Recherche

Directrice Générale des Services

M. le Professeur Frédéric FLEURY

M. le Professeur Hamda BEN HADID

M. le Professeur Didier REVEL

M. le Professeur Philippe CHEVALIER

M. Fabrice VALLÉE

Mme Dominique MARCHAND

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est — Claude Bernard

Directeur : M. le Professeur G. RODE

Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud — Charles
Mérieux

Directeur : Mme la Professeure C. BURILLON

Faculté d'Odontologie

Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Directeur : Mme la Professeure C. VINCIGUERRA

Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation

Directeur : M. X. PERROT

Département de formation et Centre de Recherche en Biologie
Humaine

Directeur : Mme la Professeure A-M. SCHOTT

COMPOSANTES ET DEPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Faculté des Sciences et Technologies

Directeur : M. F. DE MARCHI

Département Biologie

Directeur : M. le Professeur F. THEVENARD

Département Chimie Biochimie

Directeur : Mme C. FELIX

Département GEP

Directeur : M. Hassan HAMMOURI

Département Informatique

Directeur : M. le Professeur S. AKKOUCHE

Département Mathématiques

Directeur : M. le Professeur G. TOMANOV

Département Mécanique

Directeur : M. le Professeur H. BEN HADID

Département Physique

Directeur : M. le Professeur J-C PLENET

UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques
et Sportives

Directeur : M. Y. VANPOULLE

Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon

Directeur : M. B. GUIDERDONI

Polytech Lyon

Directeur : M. le Professeur E. PERRIN

Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique

Directeur : M. G. PIGNAULT

Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1

Directeur : M. le Professeur C. VITON

Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education

Directeur : M. le Professeur A. MOUGNIOTTE

Institut de Science Financière et d'Assurances

Directeur : M. N. LEBOISNE

RÉSUMÉ

La création de paysages virtuels réalistes est un défi majeur de l'informatique graphique. Le but de cette thèse est d'amplifier un terrain de grande taille et d'ajouter du dynamisme en animant des phénomènes pseudopériodiques. Nous nous sommes alors intéressés aux scènes comprenant des rivières : la modélisation de ce type de scène inclut la génération de la géométrie du réseau hydraulique mais aussi l'animation du mouvement de l'eau correspondante. Bien que ces deux éléments aient été étudiés individuellement, il n'existe pas de méthode pour générer de manière concomitante le réseau et l'animation. Afin de répondre à cette problématique, nous proposons un **nouveau modèle de représentation des rivières** permettant l'animation de la surface de l'eau ainsi qu'une **méthode de génération procédurale** pour sculpter et animer un réseau cohérent de rivières sur un terrain existant.

Notre modèle de rivière utilise les arbres de construction hiérarchique de terrain pour former la géométrie du lit de la rivière et nous proposons un nouveau modèle appelé arbre d'écoulement pour représenter la surface de l'eau. Les feuilles de l'arbre sont des primitives de flux à support compact spatialement localisées et variables dans le temps. Les fonctions utilisées représentent des caractéristiques spécifiques comme des ondulations, des turbulences ou encore des tourbillons. Elles sont procédurales et paramétrées afin de générer de la variété. Les nœuds internes de l'arbre sont des opérateurs de combinaison permettant de former la surface de l'eau. Ce modèle permet de créer une animation temps réel de l'eau sur des rivières de plusieurs kilomètres de long tout en comportant localement du détail .

Nous proposons également une méthode de génération de rivière qui utilise l'élévation d'un terrain de base pour obtenir le réseau d'écoulement. Il creuse ensuite le lit des rivières dans le terrain et génère de manière concomitante l'animation de la surface de l'eau. Les caractéristiques, telles que la largeur, la profondeur et la forme du lit de la rivière, ainsi que l'élévation et l'écoulement de la surface du fluide, sont fonction du terrain et du type de la rivière. Le lit de la rivière est creusé dans le terrain en combinant des primitives d'élévation à support compact échantillonnées le long de la trajectoire de la rivière. La génération permet la production d'une vaste gamme de formes de rivières, allant des rivières à méandres dans les plaines aux rapides de montagnes. Le modèle permet une édition interactive et intuitive des trajectoires des rivières mais aussi du choix des primitives. Notre méthode de création de rivière permet d'amplifier un grand terrain en sculptant un lit de rivière précis mais aussi de créer l'animation de la surface de l'eau correspondante.

Mots-clés : modélisation procédurale, amplification de terrain, réseaux de rivières, animation de rivière

ABSTRACT

The creation of realistic virtual landscapes is a major challenge in computer graphics. The aim of this thesis is to amplify a large terrain and add dynamism by animating pseudoperiodic phenomena. That is why we became interested in scenes involving rivers : modeling this kind of scene includes the generation of the river network geometry, but also the animation of the corresponding water movement. Although these two elements have been studied individually, there is no method to generate the network and the animation concomitantly. In order to solve this problem, we propose a **new river model** allowing the animation of the water surface as well as a **procedural generation method** to sculpt and animate a coherent river network on an existing site.

Our river model uses a hierarchical construction tree to form the riverbed geometry and we propose a new model called blend-flow tree to represent the water surface. The leaves of the tree, the flow primitives, are spatially localized and time-varying on compact support. The functions represent specific characteristics such as ripples, turbulences or eddies. They are procedural and configured so they can generate variety. The internal nodes of the tree are combination operators that form the final surface of the water. This model allows to create a real time animation of the water on rivers several kilometers long while including details locally.

We also propose a river generation method that uses the elevation of a bare terrain to obtain the flow network. It then digs the riverbeds in the ground and simultaneously generates the animation of the water surface. Characteristics, such as the width, depth and shape of the riverbed, as well as the elevation and flow of the fluid surface, depend on the terrain and the type of the river. The riverbed is excavated in the ground by combining compact supported elevation primitives sampled along the river's path. The generation allows the production of a wide range of river shapes, from meandering rivers on the plains to mountain rapids. The model allows an interactive and intuitive editing of river trajectories but also of the choice of primitives. Our river creation method allows us to amplify a large area of land by sculpting a precise riverbed but also to create the animation of the corresponding water surface.

Keywords: procedural modeling, terrain amplification, river networks, river animation

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	ÉTAT DE L'ART	5
2.1	Représentation des terrains	7
2.1.1	Représentations par élévations	8
2.1.2	Représentations volumiques	10
2.1.3	Conclusion	11
2.2	Génération de terrains	12
2.2.1	Simulation	13
2.2.1.1	Érosion thermique	13
2.2.1.2	Érosion hydraulique	16
2.2.1.3	Tectonique des plaques	20
2.2.2	Génération par l'exemple	21
2.2.3	Génération procédurale	25
2.2.3.1	Génération par bruits	26
2.2.3.2	Génération par subdivisions	27
2.2.3.3	Génération par Fracturation ou Faulting	28
2.2.3.4	Génération par caractéristiques locales	29
2.2.4	Conclusion	32
2.3	Génération des réseaux hydrauliques	33
2.3.1	Réseau de rivières	34
2.3.2	Vallées	38
2.3.3	Lits de rivière	40
2.3.4	Conclusion	41
2.4	Animation de l'eau des rivières	42
2.4.1	Simulations	42
2.4.2	Méthodes procédurales	45
2.4.3	Conclusion	48
2.5	Synthèse	48
3	MODÈLE DE RIVIÈRE	51
3.1	Modélisation d'un terrain par arbre de construction	52
3.1.1	Primitives de terrain	53
3.1.1.1	Génération et représentation des élévations	54

3.1.1.2	Génération des fonctions de poids	54
3.1.1.3	Primitives ponctuelles	55
3.1.1.4	Primitives courbes	56
3.1.1.5	Primitives à contours	57
3.1.1.6	Primitives quadrangulaires	58
3.1.2	Opérateur de combinaison	59
3.1.2.1	Opérateur de mélange	59
3.1.2.2	Opérateur de remplacement	60
3.1.2.3	Opérateur d'ajout	60
3.1.2.4	Opérateur de déformation	61
3.1.2.5	Opérateur de remplissage	62
3.1.3	Comparaison avec l'existant	62
3.1.4	Résultats	63
3.2	Modélisation des rivières par arbre d'écoulement	63
3.2.1	Arbre d'écoulement	64
3.2.2	Primitives d'écoulement	65
3.2.2.1	Primitives calme, ondulation et turbulence	66
3.2.2.2	Primitives cascade et vague	67
3.2.2.3	Primitives vortex	67
3.2.3	Opérateurs animés de combinaison	68
3.2.3.1	Opérateur de mélange	68
3.2.3.2	Opérateur de remplacement	69
3.2.4	Résultats	69
3.3	Conclusion	72
4	GÉNÉRATION DES SCÈNES DE RIVIÈRES ANIMÉES	75
4.1	Bases de potamologie, géomorphologie et hydrologie	76
4.1.1	Du terrain réel au modèle numérique de terrain	77
4.1.1.1	Terrain réel	77
4.1.1.2	Acquisition	77
4.1.1.3	Création d'un Modèle Numérique de Terrain	78
4.1.2	Calcul sur des surfaces continues	79
4.1.2.1	Différentielle première et pente	79
4.1.2.2	Différentielle seconde	80
4.1.3	Analyse de l'écoulement	81
4.1.3.1	Éléments des paysages de rivières	81
4.1.3.2	Calcul des directions d'écoulement	84
4.1.4	Géométrie hydraulique	87
4.1.5	Classification de Rosgen	88
4.2	Amplification du réseau hydraulique	88
4.2.1	Construction du graphe hydraulique	90

4.2.2	Processus d'amplification	90
4.2.3	Analyse et ajustement de la trajectoire	91
4.2.4	Creusement du lit de rivière	92
4.2.5	Placement des primitives de flux	95
4.3	Autres applications	96
4.3.1	Amplification de terrains annotés	96
4.3.2	Animation à partir de simulations	97
4.4	Résultats	99
4.4.1	Statistiques pour une scène	99
4.4.2	Performances	100
4.4.3	Contrôle	101
4.4.4	Comparaison avec l'état de l'art	102
4.4.5	Limitations	102
5	CONCLUSION	105
	BIBLIOGRAPHIE	109

INTRODUCTION

Le seul véritable voyage, le seul bain de Jouvence, ce ne serait pas d'aller vers de nouveaux paysages, mais d'avoir d'autres yeux [...].

— Marcel Proust, *À la recherche du temps perdu : La prisonnière*

Scènes naturelles en informatique graphique

La création de paysages naturels réalistes est un domaine majeur en informatique graphique qui trouve de nombreuses applications dans l'industrie du cinéma et du jeu vidéo mais aussi dans la planification du territoire et la gestion des risques naturels. Il est alors nécessaire d'effectuer la modélisation complète du terrain, de la végétation, du ciel, mais aussi des réseaux de rivières.

Créer une scène naturelle revient à choisir les objets et les phénomènes qui composeront notre paysage, les modéliser, les placer, les animer et enfin les visualiser. Nous ne nous intéresserons pas dans ce manuscrit à la visualisation. Traditionnellement, nous distinguons trois méthodes de création de paysages numériques : la simulation, l'édition interactive et la modélisation procédurale. La simulation utilise un modèle physique et est régie par des équations physiques locales. La création est complètement guidée par ces équations et il est difficile de contrôler le résultat obtenu. L'édition interactive permet au contraire la création de contenu à partir d'outils locaux. L'utilisateur est amené à sculpter la scène. Cependant, pour créer des scènes de très grande taille, le travail de l'artiste peut être long et le réalisme du résultat n'est pas garanti. Enfin la génération procédurale propose une approche de génération automatique pour de grande taille basé sur le résultat. Cet outil de création utilise des modèles macroscopiques qui peuvent être phénoménologiques –formalisant les effets sans se soucier des causes–, ou analytiques –utilisant les solutions d'intégrations des équations locales–.

Les attentes pour la génération et l'animation de mondes virtuels sont de plus en plus importantes et les améliorations matérielles ne suffisent pas à résoudre tous les verrous techniques. Le modèle de comparaison de GÉNEVAUX [Gén15] met en avant les défis du domaine. Ils peuvent se traduire par cette interrogation :

Comment l'artiste peut-il créer de grandes scènes détaillées, variées qui représentent sa pensée mais qui restent réalistes tout en respectant des contraintes de temps et de mémoires ?

Tandis que des avancées significatives sont à noter pour modéliser les phénomènes individuellement, les aspects dynamiques des paysages ont été sous-explorés. Ceci est regrettable puisque les effets dynamiques, tels que le vent ou les cours d'eau, lorsqu'ils sont présents, ont un impact visuel important. Ils ajoutent du dynamisme aux scènes statiques et contribuent significativement à rendre un paysage virtuel convaincant.

Nous souhaitons offrir aux artistes des outils de création de scène de très grandes tailles sans pour autant les limiter dans leur processus de création. **Les outils de création de paysages proposés devront permettre aux artistes de créer des paysages convaincants¹ mais surtout permettre un contrôle de la création même si cela vient à l'encontre de la physique.** Nos travaux se feront donc en deux étapes. L'analyse, tout d'abord, permettra de définir l'organisation et d'assurer la cohérence des éléments générés. La synthèse, ensuite, utilisera les résultats de l'analyse pour créer du contenu cohérent et varié mais surtout permettra à l'utilisateur de contrôler la création de la manière la plus directe possible.

Génération de paysages hydrauliques

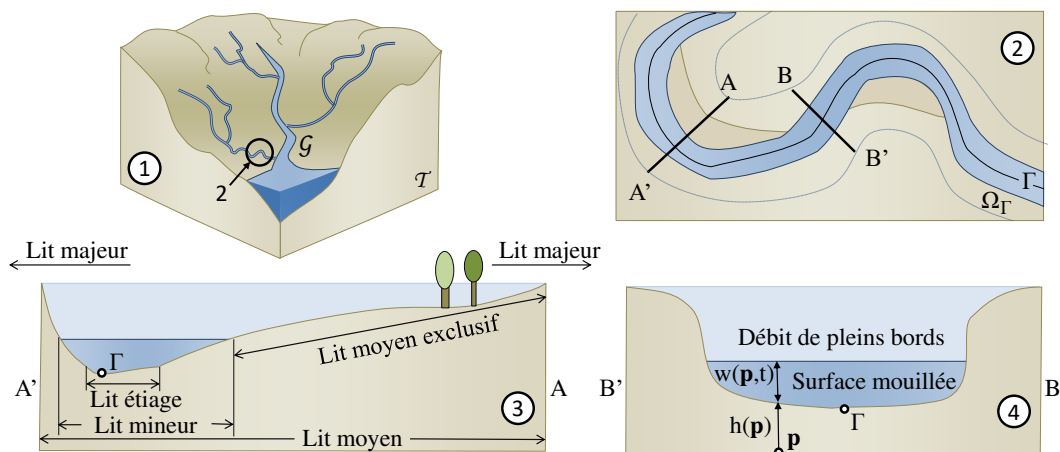


Figure 1 : Éléments constituant une rivière. Afin de créer une rivière dans une scène naturelle, nous proposons une méthode de génération procédurale qui permet de définir le réseau hydraulique \mathcal{G} sur le terrain \mathcal{T} , la trajectoire Γ , le lit mineur et le lit moyen sur un domaine Ω_Γ , mais aussi l'animation de la surface de l'eau sur un terrain existant en utilisant des règles d'hydromorphologie. La géométrie de la rivière est alors définie comme une fonction d'élévation $h(\mathbf{p})$ et la surface comme hauteur d'eau animée $w(\mathbf{p}, t)$.

Un grand nombre de travaux se sont intéressés de façon indépendante à la modélisation du terrain d'une part et à la modélisation et l'animation de l'eau d'autre part. Cependant, la modélisation précise des lits de rivières et l'animation de la surface de l'eau n'ont jamais été étudiées de manière concomitante. Les rivières se différencient des autres surfaces d'eau libre par une interface eau/support très complexe et le défi ne consiste pas simplement à créer

1. Le terme convaincant réfère ici à un paysage qui donne l'impression d'être face à la nature.

une structure de lit de rivière précis et varié, allant des méandres aux cours d'eau en tresse, mais aussi à créer localement des mouvements d'eau spécifiques tels que les ondulations, les tourbillons, les vortex, les remous, les vagues déferlantes ou encore les cascades. Aussi pour obtenir une animation précise de l'eau, il est nécessaire d'avoir un lit de rivière détaillé.

La création du support de la rivière commence par la création d'un graphe hydraulique. Ensuite, il faut définir le lit de la rivière. Celui-ci se divise en quatre parties dépendantes de la hauteur de la ligne d'eau et du débit. Le lit d'étiage correspond au domaine sous l'eau borné par le niveau annuel le plus bas (l'étiage), par souci de simplicité nous le résumons à la trajectoire² de la rivière. Le lit mineur correspond à la zone la plus souvent en eau. Nos travaux modélisent l'eau de la rivière sur ce support. Le lit moyen est défini par le débit de plein bord qui arrive lors des crues annuelles ou biennales. Cet espace est souvent soumis à l'effet de l'eau et cela modifie son relief. Notre modèle de rivière prend en compte cette surface. Enfin le lit majeur, ou plaine alluviale, n'est que très rarement en eau. Nous ne nous intéressons pas à ce domaine car cette partie relève plus du terrain que de la rivière. Même si ce manuscrit se veut autosuffisant, la lecture de MALAVOI et al. [MB] permet une compréhension globale et poussée des définitions et des phénomènes d'hydromorphologie fluviale (forme de la terre) et le manuel de GOUTX et al. [GL] présente les connaissances sur l'hydraulique des cours d'eau (forme de l'eau). Modéliser une rivière consiste à définir la trajectoire de la rivière Γ , puis la géométrie de son lit mineur et majeur sur le domaine soit la hauteur $h(\mathbf{p})$ au niveau de la rivière et enfin à définir la hauteur de l'eau $w(\mathbf{p}, t)$ qui dépend du temps pour créer une animation (Figure 1).

Les modèles physiques et analytiques garantissent des résultats réalistes physiquement et visuellement. Ils permettent en outre de représenter les interactions complexes entre le fluide et les solides, les conditions aux bords et l'activité sous-marine. Cependant les contraintes de scalabilité, de temps de calcul et de contrôle ne permettent pas d'utiliser ces modèles sur des réseaux de plusieurs kilomètres de long avec une résolution fine. De plus, les simulations de fluide nécessitent un lit de rivière très détaillé pour produire des résultats convaincants et cette étape est souvent laissée à l'artiste.

Les modèles phénoménologiques résolvent ces problèmes de performances mais ne permettent pas de garantir un réalisme physique. Ils se concentrent sur le réalisme visuel et l'efficacité des calculs. Les techniques procédurales représentent souvent la surface de l'eau comme une fonction de bruit dépendant uniquement du temps. Cependant elles ne permettent pas de capturer l'influence des matériaux du lit de rivière comme le sable ou les gravillons mais aussi les obstacles, tels que les rochers ou les branches mortes qui complexifient grandement les mouvements de l'eau. Il faut alors repenser le modèle d'animation de l'eau pour ajouter de la variété de manière localisée.

2. La trajectoire Γ des rivières est parfois floue, comme dans le cas des deltas et des tresses. En réalité, il est possible de considérer en fonction des cas, soit plusieurs trajectoires, soit une trajectoire avec un profil alternant des lits mineurs et lits moyens.

Plan de la thèse

Ce manuscrit s'intéresse à la création de paysages de rivières animées à partir d'un terrain initial. Ce travail présente un **nouveau modèle de rivière** qui unifie le terrain et l'eau animée et une **méthode d'amplification** qui utilise ce modèle pour amplifier un terrain de grande taille par l'ajout d'une rivière animée.

Dans le **chapitre 2**, nous présentons un état de l'art des techniques pour générer et animer des scènes naturelles réalistes. Après avoir rappelé les principales représentations de terrains, nous exposons les méthodes de génération de terrain qui se divisent en trois grands groupes selon le principe utilisé. Nous nous intéressons ensuite aux méthodes qui permettent de générer des paysages de rivières selon l'échelle envisagée. Enfin, nous présentons les techniques existantes de modélisation et d'animation de l'eau pour un réseau de rivières de grande taille.

Le **chapitre 3** présente le modèle novateur d'animation d'eau. Un arbre de construction composé de feuilles comprenant des fonctions dépendantes de temps permet d'animer l'eau des rivières. Ce modèle, rapide à évaluer, est léger en mémoire et permet aussi bien des rendus temps réel que des rendus déportés photo-réalistes.

Dans le **chapitre 4**, nous proposons un modèle de génération et d'animation d'un paysage structuré par son réseau hydraulique. Nous expliquerons comment les connaissances à priori en hydrologie, potamologie et de géomorphologie³, permettent la création conjointe du lit des rivières et d'animation de l'eau. Ainsi, à partir d'une carte de hauteur ne disposant pas d'information sur l'hydrologie du terrain, nos méthodes permettent de creuser un réseau de rivières à partir de modèles types et de placer de manière cohérente nos primitives d'animation d'eau.

3. Respectivement les sciences de l'eau, des cours d'eau et du relief

ÉTAT DE L'ART

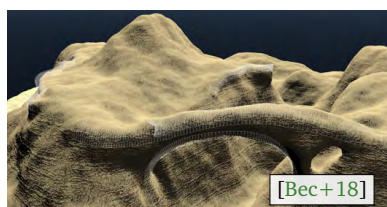


Table des matières

2.1	Représentation des terrains	7
2.1.1	Représentations par élévations	8
2.1.2	Représentations volumiques	10
2.1.3	Conclusion	11
2.2	Génération de terrains	12
2.2.1	Simulation	13
2.2.2	Génération par l'exemple	21
2.2.3	Génération procédurale	25
2.2.4	Conclusion	32
2.3	Génération des réseaux hydrauliques	33
2.3.1	Réseau de rivières	34
2.3.2	Vallées	38
2.3.3	Lits de rivière	40
2.3.4	Conclusion	41
2.4	Animation de l'eau des rivières	42
2.4.1	Simulations	42
2.4.2	Méthodes procédurales	45
2.4.3	Conclusion	48
2.5	Synthèse	48

La génération de scènes naturelles est un domaine de recherche important depuis les débuts de l'informatique graphique [Car80 ; Max81]. Nous nous intéressons à la synthèse de paysages de rivières qui se composent d'un terrain, d'un ensemble de lits de rivières formant un réseau hydraulique et d'eau en mouvement. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur les méthodes permettant de générer la géométrie de ces scènes et d'animer l'eau des cours d'eau. L'approche classique pour générer des paysages consiste à suivre une structure hiérarchique, c'est à dire, créer le support puis le décorer avec des éléments de plus en plus petits (villes, arbres, pierres) [RB85 ; Chi+97]. Selon ce principe, les techniques de génération et d'animation proposées pourront être décorées par la suite et nous ne nous intéresserons pas à ces méthodes. L'état de l'art de SMELIK et al. [Sme+09 ; Sme+14] regroupent différents travaux de décorations procédurales. Nous n'aborderons pas non plus les techniques de visualisation.

Les éléments négligés volontairement dans cet état de l'art influencent grandement la perception. Aussi, avec l'évolution matérielle, il est parfois difficile d'évaluer les techniques de modélisation et il est important de trouver des caractéristiques objectives pour juger d'une méthode. Nous invitons à ce propos, le lecteur à lire la taxonomie sur les modèles de terrain et leur génération proposée dans la thèse de GÉNEVAUX [Gén15] et approfondie dans l'état de l'art de GALIN et al. [Gal+19]. Bien que ces classifications aient été développées pour les terrains, leur utilisation peut s'adapter pour qualifier les modèles de génération et d'animation de l'eau.

L'objectif de cette thèse est de proposer un modèle de génération et d'animation de paysage de rivières utilisable par des artistes. Une attention particulière est donc donnée à l'édition qui se définit par les moyens de contrôle, le temps du retour utilisateur et l'expressivité, qualifiant la variété de création possible. Puisque le contrôle utilisateur nous semble primordial, nous préférons des résultats proches de la volonté de l'artiste plutôt qu'un réalisme physique pur.

Afin de cerner les verrous techniques, il est nécessaire de rappeler les spécificités des scènes naturelles de rivières animées. Les rivières s'étendent sur des kilomètres et les matériaux du lit de rivière influent grandement l'animation de l'eau. De plus, les interfaces entre les différents milieux sont complexes en particulier à cause de l'alternance des régimes d'écoulement qui sont fonction du lit de rivière et du débit de l'eau. Bien que les différentes étapes aient été étudiées individuellement, les méthodes créées ne mettent pas à profit les connaissances sur les lits des rivières pour permettre une animation de l'eau cohérente et il n'existe pas de méthode pour générer de manière concomitante le support du réseau hydraulique et l'animation de la rivière.

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art des techniques de modélisation et de génération de paysages animés naturels comportant un vaste réseau de rivières. Pour cela, nous commencerons par rappeler les différentes représentations de terrain (section 2.1). Nous présenterons ensuite les méthodes habituelles pour leur génération (section 2.2). Nous détaillerons alors les méthodes développées spécifiquement pour les réseaux de rivière en

fonction de l'échelle d'étude (section 2.3). Nous finirons ce travail préliminaire par une analyse des modèles de représentation et d'animation d'eau, en nous focalisant sur leur utilisation pour les rivières (section 2.4).

2.1 Représentation des terrains

La représentation des terrains est le point de départ de toute modélisation de scènes naturelles et le choix de la structure utilisée est primordiale pour poursuivre le travail de création. Les principaux critères de choix sont : la variété des reliefs et de leurs caractéristiques obtenables, les méthodes de génération utilisables mais aussi la taille de stockage nécessaire. Différentes classifications ont été proposées afin d'aider à choisir une représentation.

Les premières méthodes classifient les représentations et les méthodes de génération selon leur inspiration : simulation, génération procédurale ou édition [Pey10 ; Mar10].

La représentation de terrain est étudiée en informatique graphique mais également pour les géosciences et particulièrement dans les Système d'Information Géographique [Hd09]. NATALI et al. [Nat+13] proposent alors une taxonomie pour différencier les méthodes de création de terrain et leurs représentations selon leur domaine d'utilisation. Une attention particulière est portée sur la quantité de données manipulées.

Par la suite, GÉNEVAUX [Gén15] propose un modèle de comparaison qui met en relief les particularités des représentations des terrains mais aussi celles des différentes méthodes de générations et d'édition. Il regroupe six critères : l'utilisation mémoire, la vitesse de calcul, l'intuitivité, l'expressivité, le réalisme et enfin l'échelle de taille selon la résolution. Il est alors possible de rendre compte de la qualité de ce qui est représenté, du contrôle dont dispose l'artiste et enfin de l'efficacité de la méthode. Ces éléments pratiques sont repris par GALIN et al. [Gal+19] qui regroupent l'utilisation mémoire et la vitesse de calcul dans une même catégorie. Cette dernière taxonomie peut s'utiliser également pour la génération des rivières mais également l'animation de l'eau.

Cette section présente les méthodes principales utilisées en informatique graphique. Je vous invite à lire les états de l'art de :

- GALIN et al. [Gal+19] pour la modélisation des terrains en informatique graphique,
- NATALI et al. [Nat+13] pour des explications sur les surfaces souterraines,
- PAJAROLA et al. [PG07] pour les techniques de rendu de terrain temps réel,
- MAHDAVI-AMIRI et al. [MAAS15] pour les représentations à l'échelle planétaire.

Pour modéliser des terrains en informatique graphique, il est possible de définir trois grandes classes de représentations. Les représentations d'élévation permettent de définir l'élévation en chaque point du domaine étudié. Les représentations surfaciques non planaires permettent

de représenter les surplombs et les arches en caractérisant les surfaces des terrains. Enfin les représentations volumiques permettent de caractériser l'intérieur des représentations.

Chacune de ces représentations peut définir l'information ponctuellement (représentations discrètes) ou de manière continue sur l'ensemble du domaine (représentations par fonctions). Dans le premier cas, la description du terrain est limitée par la quantité de données alors que dans le second la résolution est infinie. Cependant, en pratique, les fréquences utilisées pour les fonctions limitent les détails à une échelle donnée.

2.1.1 Représentations par élévations

Les terrains d'élévation \mathcal{T} se définissent sur un domaine $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ par une fonction h qui définit la hauteur en chaque point du terrain. Cette représentation ne permet pas d'avoir de surplombs, de grottes ou d'arches, voir Figure 2.

On a :

$$h : \begin{cases} \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \\ (x, y) \mapsto z = h(x, y) \end{cases}$$

Ces surfaces 2, 5D permettent de facilement analyser et extraire des données géomorphologiques telles que la pente ou la courbure.

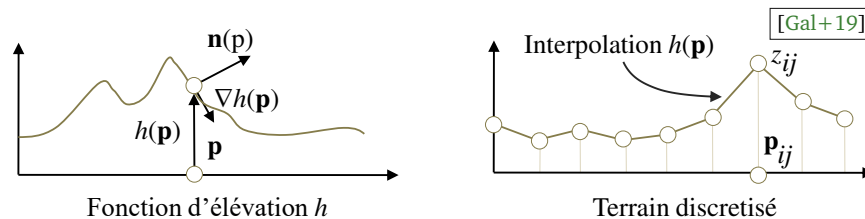


Figure 2 : La représentation par élévation peut représenter des fonctions analytiques, procédurales ou encore des élévations discrètes qui permettent de reconstruire le terrain à l'aide de fonctions d'interpolation.

Les surfaces discrètes $h_i(\mathbf{p}_i)$ se composent de données sur la hauteur du terrain. Le terrain est alors obtenu sur Ω par interpolation des élévations h_i de certains points \mathbf{p}_i

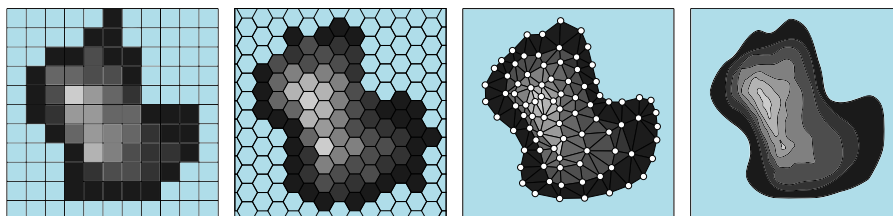


Figure 3 : Les représentations discrètes d'élévation de terrain regroupent, de gauche à droite, (1) les modèles numériques de terrain (MNT) aussi appelés raster, (2) les représentations par pavage hexagonal, (3) les réseaux irréguliers de triangles (TIN) et (4) les cartes d'isocontour.

Il est possible de différencier les méthodes de tessellations et les cartes d'isocontour (Figure 3). Dans le premier cas, l'espace est partitionné avec des cellules sans intersections. Il est alors possible de classer les représentations en fonction de la régularité de ces cellules. Dans le second cas, l'objectif est de stocker des lignes de niveau comme il est fréquent de voir sur les cartes topologiques. Des méthodes pour créer des surplombs ont été proposées en utilisant une carte de déplacement horizontal [GM01].

L'élévation peut aussi être représentée par une fonction h ou par la combinaison de différentes fonctions. Ces fonctions sont généralement procédurales. Elles sont compactes en mémoire et permettent de créer du détail indéfiniment. Le choix des fonctions peut cependant rendre coûteux l'évaluation des hauteurs à certains points.

Il est possible de créer une fonction qui permet d'évaluer l'élévation sur l'ensemble du terrain et qui dispose de peu de paramètres. Il s'agit souvent de fonctions de bruit [Per85 ; MKM89 ; Lag+09]. Il est cependant difficile de contrôler la forme du terrain et presque impossible de faire apparaître une caractéristique souhaitée à un endroit précis.

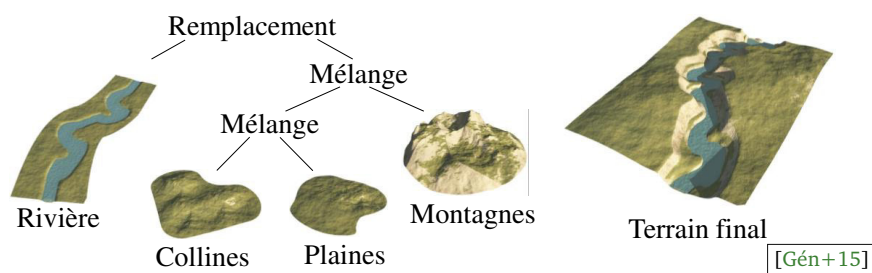


Figure 4 : Les arbres de construction de terrain utilisent des primitives représentatives des caractéristiques des terrains telles que des plaines ou des montagnes. Ces primitives sont ensuite combinées grâce à des opérateurs pour former le terrain final.

À la place d'utiliser une seule et unique fonction pour représenter l'intégralité du terrain, il est possible de définir des fonctions pour différentes zones du terrain. Ces zones peuvent être de différentes tailles et il est nécessaire de définir comment se comporte le terrain sur les zones où elles se superposent. Des opérateurs permettent alors de combiner les différentes fonctions d'élévations. Cette structure hiérarchique s'appelle arbre de construction et a été définie par GÉNEVAUX et al. [Gén+15] (Figure 4).

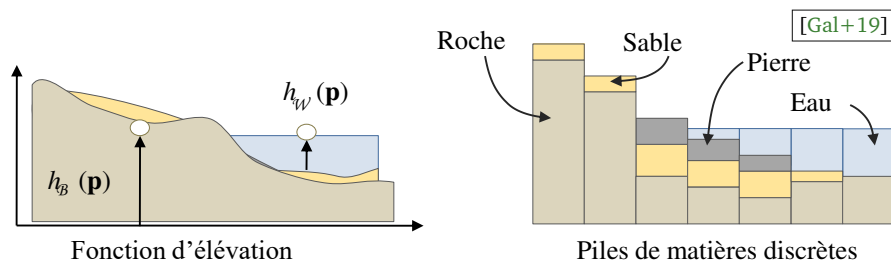


Figure 5 : Les modèles de représentation par couches représentent les différents matériaux suivant un ordre prédéfini (roche puis sable, pierres et enfin eau).

Les terrains peuvent être représentés par différents matériaux ordonnés (Figure 5). Il est alors possible de définir plusieurs fonctions d'épaisseurs, qui sont donc relatives par rapport à la couche inférieure, pour les différents matériaux. On parle alors de représentation par couche. Cette approche a été proposée par MUSGRAVE et al. [MKM89] pour représenter les différents sédiments puis a été reprise pour d'autres matériaux comme le sable ou la quantité de roche sur le sol [BF01a ; Cor+17] pour les méthodes d'érosion hydraulique. Cette représentation est très utilisée pour les méthodes de simulation. Chaque couche peut être vue comme une fonction d'élévation. Ainsi les piles de matériaux sont définies sur une grille discrète à la manière des cartes d'élévation, qui est un compromis entre les cartes de hauteur et les voxels. Il est aussi possible de l'utiliser dans les arbres de construction [Gén+15].

2.1.2 Représentations volumiques

L'élévation ne permet pas de représenter la structure interne des éléments et les couches seules ne sont pas toujours exploitables car l'ordre des matières est établi. On appelle représentation non-planaire une fonction qui permet de capturer les ressauts, les grottes et les arches (Figure 6).

Alors que les représentations surfaciques définissent les bords des terrains, les représentations volumiques définissent en plus des représentations surfaciques l'intérieur des éléments. Une fonction μ , pour les volumes, permet alors de connaître le matériel présent pour chaque point $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$.

$$h : \begin{cases} \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathcal{M} \subset \mathbb{N} \\ (x, y, z) \mapsto \mathbf{n} = \mu(x, y, z) \end{cases}$$

avec \mathcal{M} l'ensemble des matériaux constituant le terrain.

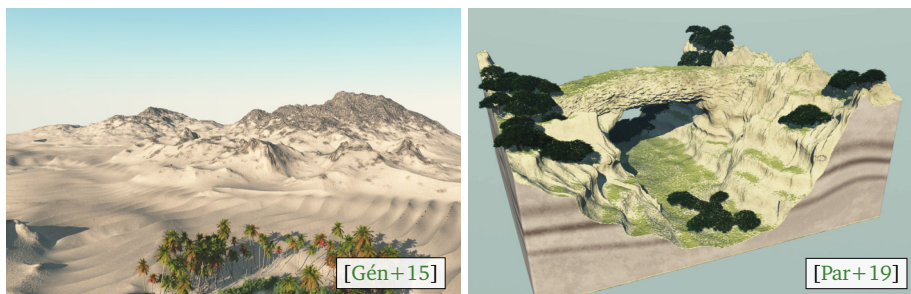


Figure 6 : Alors que les terrains surfaciques sont légers en mémoire et faciles à manipuler, ils ne permettent pas de représenter les arches et les excavations. Les terrains volumiques plus difficiles à mettre en œuvre permettent de représenter l'ensemble des caractéristiques existantes.

Il est possible de décrire les terrains volumiques avec des grille 3D régulières contenant le type de matériel de chaque cellule appelée voxel [Rya07]. Cette représentation permet de stocker n'importe quelle topologie et il est possible de représenter des structures complexes. Cependant la résolution est limitée par la résolution de la grille et il n'est donc pas possible

de représenter des pentes lisses. Cette représentation est également coûteuse en mémoire car il est nécessaire de stocker l'information explicitement sur des grilles 3D. Des structures permettent d'optimiser le coût de stockage comme les octrees de voxels éparses ou *sparse voxel octree* (SVO) [LK11], ou de manière encore plus importante avec des graphes dirigés acycliques [KSA13] ou les transformations symétriques [VMG16]. Les voxels sont souvent utilisés dans les processus de simulation, [sous-section 2.2.1](#). Tout comme pour les cartes de hauteur, la structure régulière permet une évaluation rapide de $\mu(\mathbf{p})$ mais il est coûteux d'extraire la surface.

À partir d'une fonction implicite f , il est possible de créer une surface \mathcal{S} tel que $\mathcal{S} = \{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3 \mid f(\mathbf{p}) = 0\}$. Il est alors possible de définir l'intérieur du terrain à l'aide du signe de la fonction f . Pour l'utiliser, des primitives avec des champs de distance sont définies et sont combinées avec des opérateurs mathématiques. Des arbres de construction, blob-tree ont été définis [WGG99] et sont réutilisés pour créer des terrains géologiques avec des reliefs convexes complexes [Par+19]. Les algorithmes de reconstruction pour trianguler la surface des éléments nécessitent une fonction f de classe C^0 , voir C^1 . Ces méthodes s'apparentent à la géométrie constructive des solides (CSG) qui utilise des objets simples et des fonctions booléennes pour créer des objets complexes. Différents modèles vectoriels ont été utilisés avec des terrains. Ils utilisent en général des primitives combinées à des fonctions de distances [Wan+11] ou des équations de diffusion [Hna+10]. Les méthodes qui utilisent des primitives à squelettes sont adaptées à l'édition.

Une méthode hybride s'inspirant des représentations par couches et des surfaces implicites a été développée spécifiquement pour les terrains [Pey+09a]. Les surfaces implicites permettent de sculpter et de générer la surface du terrain et un modèle discret permet de modifier le volume du terrain. Les piles de matières ne sont pas ordonnées et l'utilisation de l'air comme matière permet de créer des scènes complexes contenant des arches, des grottes et des surplombs. La surface du terrain est issue du champ f obtenu par convolution \star entre la pile de matière μ et un élément filtrant k . On a alors :

$$f(\mathbf{p}) = (2\mu \star k(\mathbf{p})) - 1 \qquad \mu \star k(\mathbf{p}) = \frac{\mathcal{V}_{\mathcal{M}}(\mathbf{p})}{\mathcal{V}_{\Omega}}$$

avec $\mathcal{V}_{\mathcal{M}}$ la quantité de matière présente dans le domaine du noyau Ω et \mathcal{V}_{Ω} le volume du noyau ([Figure 7](#)). Cependant malgré différents travaux pour accélérer le rendu [LMS11 ; LS12], l'extraction de la surface reste coûteuse.

2.1.3 Conclusion

Différentes représentations de terrain ont été développées selon l'utilisation et le domaine considéré. Les méthodes par élévation ont longtemps été utilisées car elles sont plus légères en mémoire et plus faciles à visualiser que les représentations volumiques. Les modèles sur

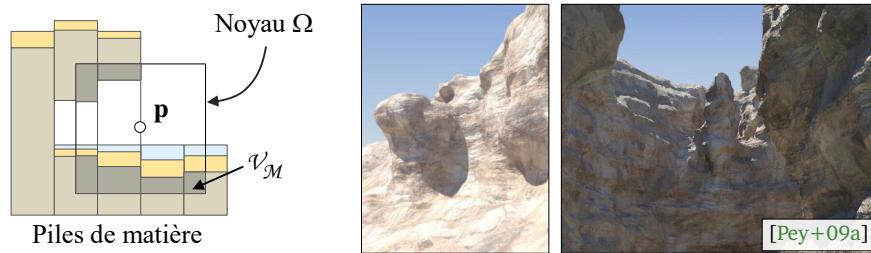


Figure 7 : Le terrain est représenté par une méthode hybride combinant une structure volumique discrète et une représentation implicite. Le volume de matière \mathcal{V}_M à l'intérieur du domaine Ω du noyau de convolution permet d'extraire la surface.

des grilles régulières impliquent une résolution constante sur l'ensemble du terrain et ne sont pas adaptées à la création de détails localisés.

Les modèles 2, 5D ne permettent pas de représenter les caractéristiques telles que les arches ou les grottes, ce qui crée parfois un manque de réalisme. Différentes approches ont été proposées pour combiner les différentes représentations cependant la multiplicité des représentations complexifie les phases d'édition.

Le choix de la représentation influence également la phase d'édition. Les modèles permettant des déformations locales sont adaptés aux modifications. Les modèles articulés autour de squelette permettent une construction intuitive.

2.2 Génération de terrains

Les représentations étant détaillées, nous présentons maintenant les méthodes de création, d'amplification et de modifications de terrains. On parle ici de création si le contenu est créé et donc que l'on n'utilise pas de terrain d'entrée. Une amplification de terrain consiste à prendre un terrain d'entrée et à le modifier pour l'embellir. Enfin comme son nom l'indique, la modification du terrain, à la différence de l'amplification, consiste à utiliser un terrain en entrée mais en changeant fortement son relief. On appelle génération l'ensemble de ces trois catégories.

Il est possible de classer les méthodes de génération en trois groupes. La simulation permet de générer un terrain en utilisant les actions naturelles liées au temps et aux phénomènes physiques l'accompagnant. La génération par l'exemple utilise des terrains existants pour générer un contenu nouveau. Enfin les méthodes procédurales utilisent des règles de créations définies par l'utilisateur pour créer le contenu.

2.2.1 Simulation

Alors que les *approches procédurales* modélisent macroscopiquement les phénomènes, les *méthodes de simulation* utilisent les équations particulières pour provoquer des résultats macroscopiques. Les simulations sont des systèmes complexes et les caractéristiques de terrain générées sont issues des interactions entre les éléments simulés.

Les simulations de terrain utilisent très généralement les différents types d'érosion affectant les sols. L'*érosion* se caractérise par une usure de la surface. Le processus traditionnel se résume en trois étapes (Figure 8). D'abord de la matière se *détache* progressivement en un point. Ensuite, elle est *transportée* par le milieu d'érosion. Enfin, elle finit par se *déposer* en un autre point. Les principaux facteurs d'érosion sont l'eau, le vent et le mouvement de masse. Pour l'eau les phénomènes d'érosion les plus étudiés sont : la pluie et l'écoulement associé, les rivières, les glaciers mais aussi l'érosion côtière.

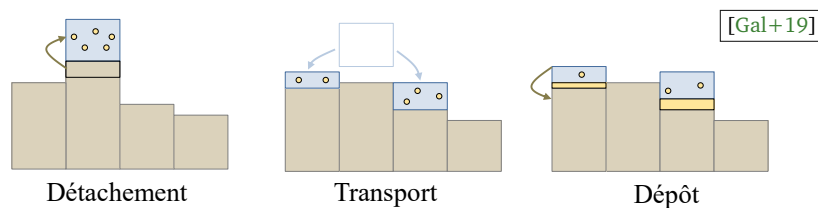


Figure 8 : Le processus d'érosion détache un morceau de matière, le transporte puis éventuellement, le dépose en un autre lieu.

Les méthodes de simulation calculent l'évolution dans le temps du terrain en fonction du milieu qui l'entoure. Elle se définit par la variation $\partial h / \partial t(\mathbf{p})$. Ce domaine est très développé en géophysique et les modèles doivent prendre en compte de plus en plus de paramètres [TH10 ; Bra19 ; WT99 ; BS97 ; SD03].

Nous classifions les méthodes de simulation suivant le milieu d'érosion.

2.2.1.1 Érosion thermique

L'érosion thermique, ou thermoclastie, joue un rôle important dans la formation des terrains. La dilatation et la contraction provoquées par les changements de température provoquent des fissures puis la cassure des matériaux. Ceux-ci, contraints par la gravité, tombent et glissent le long des pentes. Lors de la chute, les pentes se stabilisent avec un certain degré de pente et provoquent une régularité dans les paysages (Figure 9).

MUSGRAVE et al. [MKM89] proposent un modèle de fracturation puis de transport dû à la gravité. Ce modèle regroupe différentes érosions qui ne sont pas hydrauliques. Le dépôt des matériaux granulaires dépend de la friction avec la pente du terrain s et s'arrête quand un angle de repos, ou plus formellement angle de talus naturel du matériel granulaire, θ est

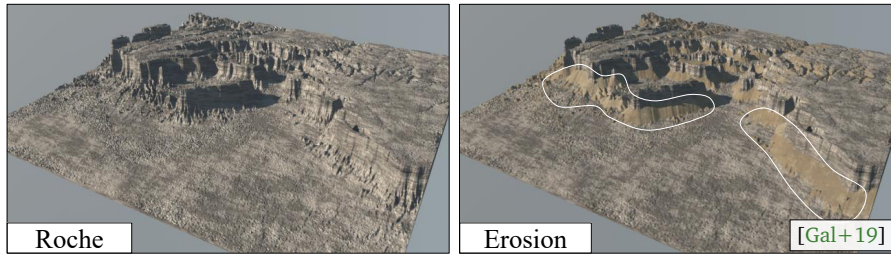


Figure 9 : L'érosion thermique forme des éboulis à la base des falaises. À gauche, un terrain sans érosion et à droite le même terrain après érosion.

atteint. Cette grandeur s'utilise comme paramètre pour contrôler la pente des éboulis au pied des reliefs érodés. En général, il varie entre $30 - 45^\circ$ degré.

L'équation correspondante est :

$$\frac{\partial h}{\partial t}(\mathbf{p}) = \begin{cases} -k(s(\mathbf{p}) - \tan \theta) & \text{si } s(\mathbf{p}) > \tan \theta \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

À chaque itération, la pente du terrain $s(\mathbf{p}_{ij})$ est calculée, si elle est inférieure à un seuil $\tan \theta$ il n'y a pas d'érosion, sinon de la matière est retirée du terrain proportionnellement à la pente ($\tan \theta - s(\mathbf{p})$). La matière est distribuée sur les cellules voisines (Figure 10). Si cette méthode est utilisée avec une représentation par couche, la quantité de roche érodée est convertie en gravas. L'algorithme s'arrête quand il n'y a plus de matière à retirer.

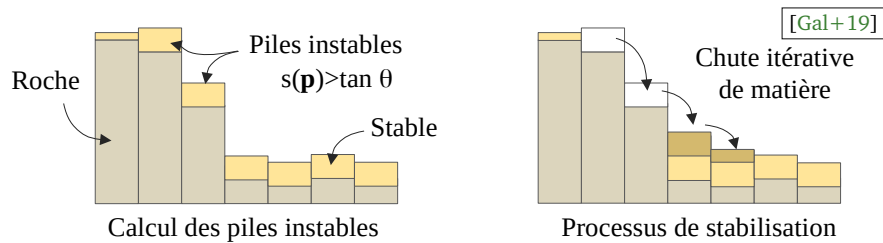


Figure 10 : Dans le cadre de l'érosion thermique, tant que la pente est à une valeur seuil, de la matière est distribuée sur les cellules voisines.

ROUDIER et al. [RPP93] propose une résistance de la roche pour l'érosion thermique et hydraulique. Pour ce faire, la géologie sous-jacente est approximée suivant la fonction volumique $\rho : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ représentant la résistance des différents matériaux. En général, la résistance est constante sur la verticale du terrain et on peut simplifier la fonction : $\rho : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. L'équation de l'érosion est alors modifiée comme suit :

$$\frac{\partial h}{\partial t}(\mathbf{p}) = -\rho(\mathbf{p}) (s(\mathbf{p}) - \tan \theta)$$

L'érosion thermique a été utilisée pour simuler les plateaux type Mesa [BA05b] en modélisant la roche et le sable.

Les algorithmes d'érosion précédemment proposés s'appliquaient sur des cartes numériques de terrain et ne permettaient pas d'éroder les falaises pour former des grottes et des surplombs. Une variante a été proposée pour gérer le relief des falaises [Ito+03]. L'algorithme génère procéduralement des fractures autour de groupes de voxels qui représentent des blocs de roche. Une simulation discrète est ensuite calculée sur ces blocs qui peuvent se détacher. Le temps n'est pas considéré dans cette simulation et seul l'agencement des roches est important.

PEYTAVIE et al. [Pey+09a] propose une approximation de l'érosion thermique 3D pour la représentation hybride de surfaces implicites et de piles de matières. Un outil d'érosion est proposé à l'utilisateur pour définir une région d'érosion et détacher des blocs des falaises verticales et des pentes raides pour les transformer en matière granuleuse qui se stabilise en cônes d'éboulis (Figure 11). Les piles de roches peuvent aussi être générées depuis les couches des matériaux granulaires [Pey+09b]. Bien que cette technique permette une génération complexe de grottes et de falaises avec des surplombs, le modèle volumique est limité à des scènes de $\approx 1 \times 1 \times 1 \text{ km}^3$.

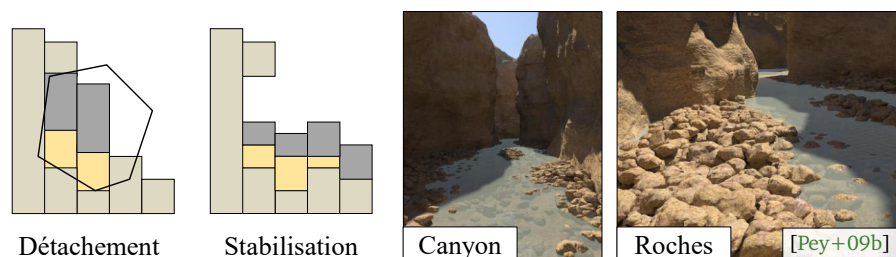


Figure 11 : Les falaises et les surplombs sont créés dans une zone d'érosion thermique définie par l'utilisateur.

L'érosion thermique a été beaucoup étudiée en informatique graphique car les équations qui la modélisent sont simples et permettent une implémentation directe même sur GPU mais aussi parce que les paramètres de contrôle, tel que l'angle de talus, sont intuitifs. Les cônes d'éboulis composés de roches et d'autres matériaux granulaires sont réalistes visuellement et physiquement. Ces méthodes sont complémentaires des méthodes d'érosion hydraulique qui creusent de profondes gorges dans les terrains afin d'harmoniser les différentes structures.

L'érosion thermique a cependant de nombreuses limitations. Tout d'abord les implémentations utilisent généralement un schéma d'intégration d'Euler explicite qui n'est correct physiquement que pour de petits pas d'intégration. Cela a moins d'importance si ce modèle est utilisé comme étape de post-processing mais ne permet pas son utilisation pour simuler des caractéristiques d'érosion sur une grande échelle [Cor+16].

Ensuite, ces modèles ne prennent pas en compte la chute des roches qui joue un rôle important sur l'érosion. Les techniques actuelles considèrent le résidu comme une matière granulaire alors qu'il peut s'agir de gros blocs dont la chute a des conséquences importantes mais qui sont plus difficiles à modéliser et à contrôler. Cet effet peut s'approximer par une approche plus générale d'érosion par débris comme utilisée en géologie [SD03].

Enfin la régularité de cette méthode peut être trop importante même avec une perturbation aléatoire sur l'angle de talus et rendre les pentes non naturelles. Les géologues préfèrent utiliser l'érosion de pente qui modélise les comportements de petites échelles par une équation de diffusion :

$$\frac{\partial h}{\partial t}(\mathbf{p}) = -k \Delta h(\mathbf{p})$$

Bien que cette équation ne prenne pas en compte les couches de matières issues de l'érosion thermique, elle construit des transitions entre les pentes visuellement convaincantes et moins régulières, surtout si elle est combinée avec de l'érosion fluviale [BS97].

2.2.1.2 Érosion hydraulique

L'érosion hydraulique a lieu lorsque l'eau détache par frottement la surface de la roche. Elle regroupe différents phénomènes tels que le ruissellement ou l'effet splash.

En informatique graphique, les techniques développées dépendent de la manière dont est simulé le fluide et donc des représentations sous-jacentes et des échelles de temps et d'espace étudiées.

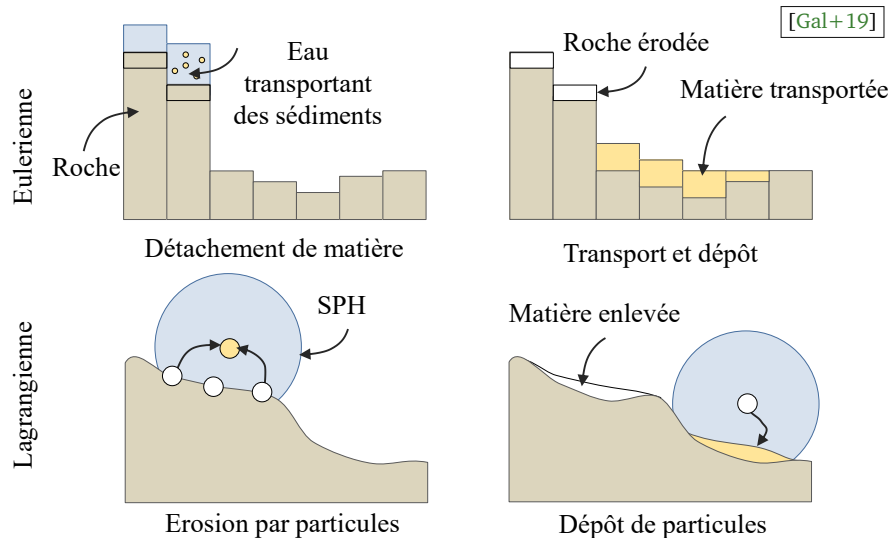


Figure 12 : Comparaison de l'érosion hydraulique pour des approches Eulériennes et Lagrangiennes.

Les mouvements d'eau qui détachent, transportent et déposent les matériaux sont décrits à partir des équations de Navier-Stokes [CF88] telles que étudiées depuis longtemps en informatique graphique [Bri08]. Le mouvement des fluides est calculé suivant les approches Lagrangienne ou Eulérienne (Figure 12). Ces méthodes sont détaillées sous-section 2.4.1. Les approches Eulériennes discrétisent l'espace par une grille et simulent la quantité de fluide dans chaque cellule alors que les approches Lagrangiennes simulent le mouvement de chaque particule de fluide en elle-même.

Approches Eulériennes Ces méthodes utilisent une grille discrète pour représenter aussi bien le terrain que le fluide le parcourant. Lors de la simulation, la pression, la vitesse et la hauteur de fluide sont calculées pour chaque cellule. MUSGRAVE et al. [MKM89] propose un modèle de simulation d'érosion hydraulique complet comprenant le détachement de la matière, son transport et son dépôt entre les cellules des cartes d'élévation. La force d'érosion est donnée pour chaque cellule selon son volume d'eau et la quantité de matière en cours de transport. Lorsque la capacité de transport maximale est atteinte, la matière se dépose au sol (Figure 13).

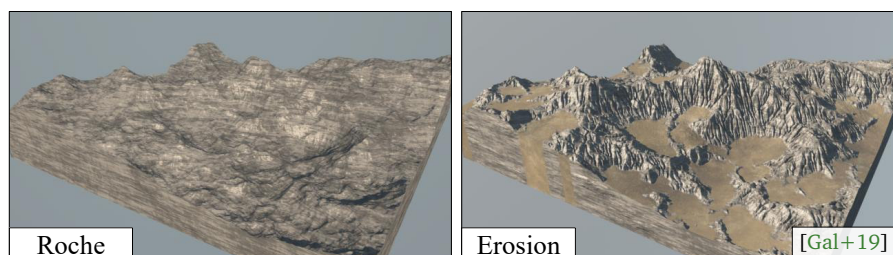


Figure 13 : Exemple d'érosion hydraulique appliquée à un terrain fractal.

Une représentation de la géologie pour modéliser les strates de roches a été proposée par ROUDIER et al. [RPP93] qui considère les caractéristiques des différents matériaux lors du processus d'érosion, ainsi les roches les plus dures s'érodent moins.

Cette approche est reprise par BENES et al. [BF02] en ajoutant un algorithme pour dissoudre les sols et prendre en compte la gravité. Ainsi, des couches de matières molles se déposent sur les lits de rivière et dans les bassins d'eau lors de l'évaporation.

NAGASHIMA, [Nag98] propose un modèle d'érosion plus complet physiquement en se concentrant sur la génération de vallées. Le modèle combine une représentation par couches géologiques des différentes strates présentes, à un modèle d'érosion thermique ainsi qu'à un processus spécifique d'érosion par écoulement.

NEIDHOLD et al. [NWD05] simulent les fluides pour connaître la vitesse de l'eau en tout point. Elle permet alors d'éroder les roches ou de déposer les sédiments. À la manière de MUSGRAVE et al. [MKM89], l'eau a une capacité de transport limitée qui définit le processus. Une implémentation parallélisée sur GPU est proposée par la suite [ASA07].

BENES et al. [Ben+06] utilisent une simulation de fluide volumique 3D pour détacher, transporter et déposer les sédiments. Une grille de voxel est utilisée pour représenter la quantité de matière présente en chaque cellule. Le mouvement du fluide est calculé sur cette grille et les forces appliquées sur la surface du terrain sont utilisées pour définir l'importance de l'érosion. Lorsque la force de l'eau est plus grande que celle de la cohésion de la roche, il y a de l'érosion et la matière est transportée par l'eau jusqu'à son ralentissement. La matière se dépose alors dans cette cellule.

L'érosion hydraulique a été utilisée pour générer des rivières et une approche issue des systèmes auto-organisés est proposée [PM13]. Un système auto-organisé est un système non équilibré qui développe des structures et des configurations sans action extérieure. La simulation dépend de l'auto-organisation et des phénomènes émergents pour synthétiser les côtes et le terrain avec des caractéristiques fractales de l'érosion hydraulique.

BENES [Ben07] utilise les simulations en eau peu profonde avec l'érosion hydraulique. Cette approche permet à l'utilisateur de positionner des sources d'eau, de contrôler leur débit et d'éditer le terrain sous-jacent. La simulation s'effectue cependant sur une représentation par couches et ne permet pas de produire des phénomènes volumiques comme les surplombs produits par l'érosion des rivières.

Les simulations de fluide sont longues à calculer en soi et l'ajout de l'érosion rend ce problème encore plus compliqué. Plusieurs méthodes proposent des améliorations sur l'implémentation pour accélérer les calculs, souvent en utilisant les unités de calculs graphiques. MEI et al. [MDH07] démontre l'utilité de l'implémentation sur GPU en proposant un retour interactif. ŠTAVA et al. [Šř08] ira plus loin et proposera un retour interactif pour des terrains par couches sur des domaines discrets de 1024^2 . VANEK et al. [Van+11] contournera les limitations mémoire en découpant le terrain en blocs qui alterneront entre mémoire graphique et mémoire RAM.

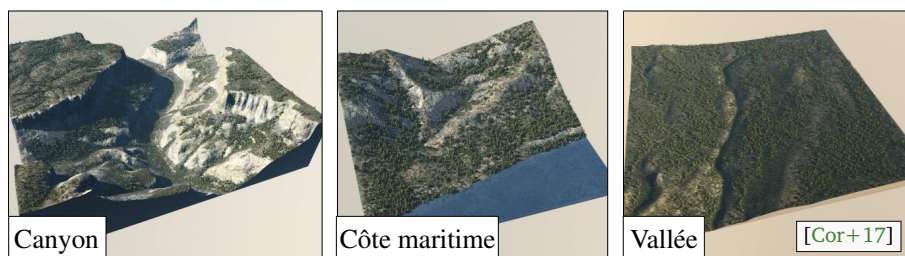


Figure 14 : Terrain érodé combiné à une simulation d'écosystème.

Une simulation plus générale des différents éléments qui impactent le terrain sur des échelles géologiques plus courtes ($\approx 1\,000$ ans) est proposée par CORDONNIER et al. [Cor+17]. La méthode combine les effets de l'érosion et de la végétation en utilisant des événements indépendants tels que des chutes d'eau violentes pour l'érosion hydraulique, des chutes de pierres, de la foudre, l'apparition ou disparition de plantes ou encore des incendies (Figure 14). Les événements sont introduits aléatoirement et se propagent de cellule en cellule le long d'un chemin sans boucle ni embranchement. Ils transforment progressivement les couches composant le terrain. Le terrain est ainsi formé par de la roche, des matériaux granulaires comme le sable, l'humus et les rochers mais aussi de la densité de végétation, de l'humidité et de l'illumination.

Approches Lagrangiennes Les approches Lagrangiennes utilisent des particules pour calculer la dynamique des fluides. Le flux se définit alors par la concentration des particules advectées.

Les méthodes d'érosion distribuent en général des particules sur l'ensemble du domaine, à la manière de la pluie. Le déplacement des particules est simulé et leur déplacement permet de modifier le terrain. De la roche se détache en se transformant en sédiment puis elle est transportée et éventuellement déposée.

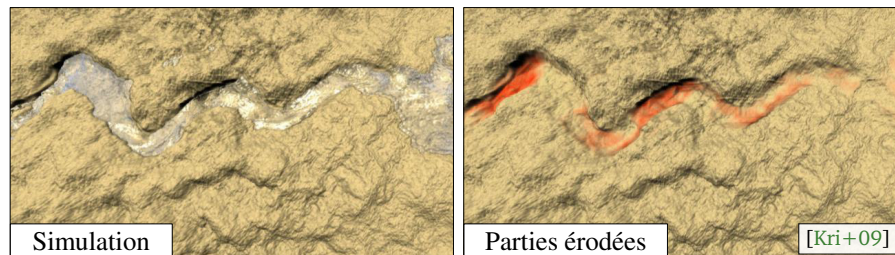


Figure 15 : Simulation d'érosion Lagrangienne : les particules d'eau forment une rivière qui érode le terrain et transporte les sédiments en aval pour les déposer.

Les particules d'eau sont proposées pour calculer les forces d'érosion exercées par l'eau sur le terrain [CMF98]. Le champ de vitesse permet de calculer le mouvement de l'eau et d'éroder le terrain. Les particules hydrodynamiques, *Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*, sont réutilisées par la suite. Lorsqu'une particule touche le terrain, elle l'érode (Figure 15) puis transporte ensuite la matière qui change de masse et lorsque la particule ralentit, la matière se dépose [Kri+09].

L'érosion par particules permet de générer des méandres dans les rivières [Kur12 ; Kur13] en creusant le lit des rivières. Comme pour la plupart des simulations, la méthode est limitée à de petits morceaux de rivières bien que la résolution pour la simulation dépende du type de la rivière considérée.

Analyse Bien que les simulations d'érosion soient souvent considérées comme le moyen le plus réaliste d'éroder les terrains car elles respectent la physique sous-jacente, il reste de nombreux problèmes à résoudre pour généraliser leurs usages.

Échelle Beaucoup d'algorithmes d'érosion hydraulique, essentiellement pour les méthodes Lagrangiennes, ne permettent que des simulations sur une petite période de temps et sur un petit domaine. Les résultats sont ensuite agrandis sur des grandes surfaces de terrain, entraînant des biais. Bien que générant des effets visuellement convaincants, cette approche ne correspond pas aux équations physiques qui ne sont pas linéaires. L'échelle des simulations dépend fortement de la représentation des terrains utilisés. Ces simulations sont donc utilisables pour générer une taille de terrain à une résolution donnée. Elles sont parfois impossibles à utiliser, soit à cause de la nature de la méthode, soit à cause du coût de calcul, soit car elles

ne permettent pas de générer les caractéristiques souhaitées. En conclusion, en fonction des phénomènes simulés, il peut être impossible de générer des terrains détaillés de très grande taille.

Contrôle En plus des problématiques d'échelles, il est souvent difficile d'avoir du contrôle sur les résultats. Les simulations d'érosion sont basées sur la physique et la géologie des terrains et permettent donc des résultats plus réalistes que les méthodes procédurales. Cependant cet avantage vient au détriment du contrôle. Les artistes définissent généralement les conditions initiales de la simulation, attendent les résultats, puis s'ensuit alors une approche par essai-erreur pour converger vers un résultat satisfaisant.

Il est fréquent d'utiliser l'érosion hydraulique et thermique pour améliorer les visuels des terrains générés procéduralement. Elles permettent de former des vallées avec différentes couches de matières, et d'ajouter des repères de l'érosion comme des gorges et des ravins. Cependant, de nombreux éléments sont négligés. De plus, le réalisme des terrains d'entrée joue un rôle crucial dans le rendu final. Idéalement, ceux-ci devraient être géomorphologiquement réalistes.

2.2.1.3 Tectonique des plaques

De nombreux travaux de géologie et géomorphologie se sont portés sur la simulation de la déformation de la croûte terrestre sous la pression de la tectonique des plaques [McC92]. Ce processus est à l'origine de l'élévation des chaînes de montagnes, appelé *orogénèse*. Ce phénomène, couplé à l'érosion, forme les montagnes [TH10]. Cependant la simulation de la tectonique des plaques pour générer des terrains en Informatique Graphique a peu été étudiée. En effet, la complexité des phénomènes géologiques rend les calculs longs. De plus, le contrôle utilisateur n'est pas direct, rendant la création graphique fastidieuse.

MICHEL et al. [MEC15] génèrent procéduralement la topographie des chaînes de montagnes à partir d'une carte créée par l'utilisateur contenant la position des pics et des rivières. Une carte des plaques tectoniques et leur vitesse associée est créée procéduralement afin de simuler l'orogénèse et donc créer une carte des plissements. Parallèlement une carte des bassins versants est créée à partir des esquisses de rivières en utilisant les équations de diffusions. À partir de ces cartes, un terrain est formé puis érodé avec une méthode hydraulique pour obtenir le terrain final.

La génération de très grands terrains à partir de la tectonique des plaques et de l'érosion fluviale a été proposée par CORDONNIER et al. [Cor+16] (Figure 16). Une loi de puissance pour l'érosion hydraulique issue de la géomorphologie [WT99] est proposée pour l'informatique graphique. Ainsi pour un point donné p la vitesse d'érosion hydraulique est calculée selon

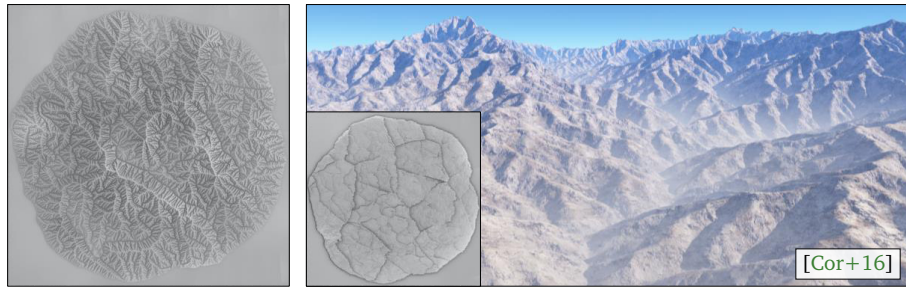


Figure 16 : Un terrain de très grande taille (100 × 100 km) généré en combinant une méthode procédurale de tectonique de plaque et de l'érosion fluviale.

l'aire de drainage $A(\mathbf{p})$, approximant le flux d'eau, la pente locale $s(\mathbf{p})$ et le soulèvement tectonique $u(\mathbf{p})$:

$$\frac{\partial h}{\partial t}(\mathbf{p}) = -kA(\mathbf{p})^m s(\mathbf{p})^n + u(\mathbf{p})$$

L'élévation de la montagne dépend donc de la tectonique des plaques et de l'érosion (Figure 16). Le soulèvement tectonique se présente sous la forme d'une carte de variation d'élévation et la simulation se résout en temps linéaire.

Ce travail est repris par l'auteur [Cor+18] en ajoutant des contraintes géologiques pour l'orogénèse et en proposant à l'utilisateur de décrire les mouvements relatifs des plaques. Le soulèvement tectonique est calculé en considérant la croûte comme étant un fluide visqueux incompressible. Les plis sont ajoutés procéduralement selon leur longueur d'onde approximée par la croûte terrestre représentée par une pile de roches avec des propriétés physiques différentes. Le terrain est ensuite érodé selon une méthode améliorée de l'algorithme précédent en prenant en compte les différentes couches de matières et permet de générer un modèle multi-matériaux.

Les simulations issues de la tectonique tentent de reproduire à grande échelle l'élévation de la roche issue de la collision des plaques comme décrit en géologie. Bien que l'échelle de ces techniques soit limitée, elles permettent de créer des chaînes de montagnes réalistes avec des réseaux de rivières issus de l'érosion hydraulique cohérents sur des domaines de ≈ 100 km avec une précision de ≈ 100 m. Le contrôle sur les plaques permet à l'utilisateur de s'exprimer sur l'allure globale du terrain mais il est difficile de contrôler les caractéristiques fines.

2.2.2 Génération par l'exemple

Les méthodes de génération par l'exemple utilisent des terrains existants pour générer du contenu nouveau [BSS07 ; EF01 ; Zho+07]. Les terrains d'exemples peuvent provenir de multitudes de sources, parfois même de simulation ou de génération procédurale. Le plus souvent ils sont issus de terrains réels scannés dans le cadre d'études géologiques. On peut citer deux immenses travaux que sont le scan des États-Unis appelé *National Elevation Dataset (NED)* [Ges+02 ; Ges+18] par l'*U.S. Geological Survey (USGS)* lancé depuis 1999 avec une

résolution de 10m qui inclut maintenant un programme 3D et un scan mondial le *Shuttle Radar Topography Mission* par différentes agences spatiales dont la NASA, depuis 2000 [Far+07] dont la version de 2015 a une résolution de 30m. Dans de rares cas, des données de l'ordre de 0.5 – 1m par pixel existent dans des zones urbaines (par exemple le programme AHN aux Pays-Bas). Ceux-ci restent rares et peu fréquents dans des régions montagneuses.

Dans cette partie nous n'approfondirons pas les méthodes d'édition par esquisse qui sont trop éloignées de la génération procédurale et de la simulation. Parmi ces méthodes, certaines permettent de définir le terrain à partir d'esquisses à la première personne [PI13 ; Tas+14a ; Tas+14b] d'autres combinent différentes informations (terrains basse résolution, orthophotographies et esquisses) pour corriger et amplifier les terrains [KRS15 ; SR16]. Leur classification peut être retrouvée dans l'état de l'art de GALIN et al. [Gal+19].

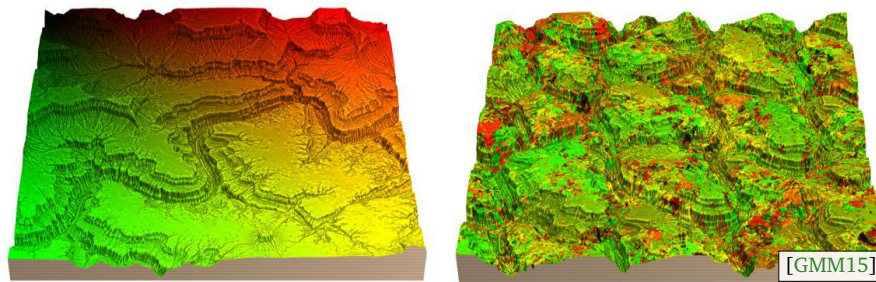


Figure 17 : La génération de terrain par synthèse de texture s'effectue en deux étapes, des morceaux d'un terrain d'exemple sont découpés (gauche) puis replacés pour former un nouveau terrain (droite).

Les méthodes usuelles de génération de terrain par l'exemple commencent par créer des bases de données de terrain \mathcal{E} puis une étape de synthèse permet d'extraire des morceaux de terrains, de les déformer $\mathcal{P}_k \subset \mathcal{E}$ puis de les placer selon une certaine fonction d'élévation $h_k(\mathbf{p})$ (Figure 17). À partir de là, un terrain \mathcal{T} est créé en assemblant l'ensemble des morceaux de terrains. Parmi les variations les plus utilisées, on peut noter des différences sur les morceaux utilisés. Certaines méthodes utilisent des patchs carrés [Zho+07 ; TGM12], d'autres des pixels individuels [GMM15] ou d'autres encore des noyaux circulaires. [Arg+17] Les variations se font également sur les méthodes d'assemblage des fragments. Alors qu'il s'agit parfois d'une interpolation linéaire [Arg+17] d'autres méthodes utilisent des assemblages complexes [TGM12].

L'utilisation de terrains d'exemples a de grands avantages. L'ensemble des phénomènes géologiques de la terre est écrit dans ces terrains scannés et les MNT sont donc réalistes, à la résolution près. De plus, les techniques récentes en synthèse de textures et en machine learning, utilisables pour la synthèse de terrain, permettent des créations interactives et un contrôle utilisateur important. Cependant, bien que ces techniques permettent la création de terrains réalistes, de manière rapide avec un contrôle utilisateur, ces techniques ne sont pas exemptes de limitations. Tout d'abord, l'utilisation de données limite la synthèse à la qualité de celles-ci et reproduit les artefacts pouvant-être présents. La résolution de l'échantillonnage

est limitée à celle de la source et les données actuellement accessibles librement sont de l'ordre de la dizaine de mètres pour un pixel.

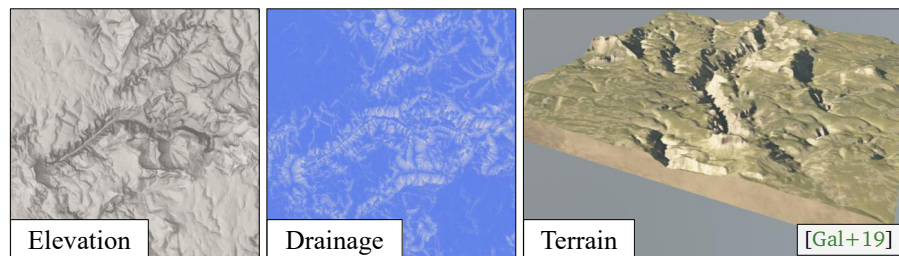


Figure 18 : La synthèse par l'exemple ne permet pas de garantir un écoulement réaliste. Les techniques développées garantissent un voisinage local cohérent mais la structure globale n'est pas contrainte. La carte de drainage montre les discontinuités du réseau hydraulique.

De plus, les caractéristiques qui n'existent pas dans la base de données ne peuvent pas apparaître dans la génération. Enfin, l'utilisation de multiples patchs combinés ne permet pas de conserver certaines propriétés grandes échelles telles que la consistance du réseau hydraulique (Figure 18). Enfin ces techniques se limitent à la création de cartes d'élévation.

Les méthodes de synthèse par l'exemple sont détaillées dans l'état de l'art de WEI et al. [Wei+09]. Des méthodes spécifiques à la génération de terrains ont été proposées. Certaines permettent un contrôle important [Zho+07]. D'autres se sont intéressées aux implémentations GPU pour accélérer les traitements [LH05 ; TGM12]. DACHSBACHER et al. [DMS05] propose une méthode pour remplir les cartes d'élévations incomplètes en utilisant la technique de EFROS et al. [EL99]. Les méthodes de synthèse basées pixel permettent un contrôle utilisateur important et une synthèse en temps réel [GMM15].

Cependant la qualité des résultats dépend des terrains d'exemples utilisés et les formes de terrains désirés doivent être présentes dans la base de données. Il serait par exemple impossible de créer des volcans cohérents s'il n'en existe pas dans le terrain d'entrée. L'échelle utilisée pour la création est également très importante et les caractéristiques vastes ayant des contraintes fortes ont tendance à disparaître. Les réseaux d'écoulement obtenus sont rarement réalistes car ils ne correspondent pas aux connaissances de géomorphologie. Le traitement de ces incohérences s'effectue en général en post-traitement. Ce problème de création contrainte reste ouvert.

L'utilisation de machine learning pour générer des terrains est peu répandue bien que prometteuse.

GUÉRIN et al. [Gué+17] utilise des réseaux antagonistes génératifs conditionnels (CGAN) entraînés sur des cartes de hauteurs dont les crêtes et les rivières sont annotées pour générer un terrain à partir d'esquisses. Ces réseaux sont composés d'un générateur qui crée un terrain le plus réaliste possible et d'un discriminateur dont le but est de différencier les terrains réels et les terrains synthétiques. En se confrontant, ces réseaux s'améliorent. Les réseaux apprennent les relations entre les annotations et les cartes d'élévations originelles et lorsque l'utilisateur

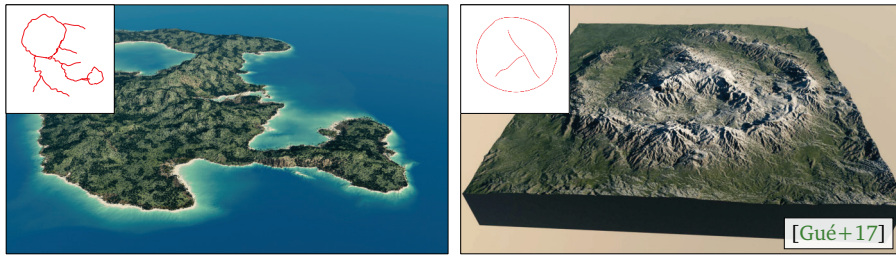


Figure 19 : La méthode de génération basée sur le Machine learning utilise un réseau profond CGAN pour générer une île à partir d'esquisses.

donne de nouvelles esquisses, un terrain correspondant est généré. Le travail de l'artiste guide la création (Figure 19) et le résultat est réaliste et interactif. Cependant le réseau doit être entraîné sur un grand nombre de données et il peut être mis en défaut selon les esquisses utilisateur. Par exemple si très peu de données sont très éparse, les résultats tendent à former des artefacts.

Le cadre d'utilisation de l'apprentissage est très vaste et peu de travaux ont encore été faits pour la génération de terrains. Il peut être utilisé dans de nombreux cas : remplir des données manquantes, améliorer la résolution en apprenant sur des données plus fines. De plus, l'utilisation d'annotations lors de l'entraînement permet de créer différentes formes d'interactions. Ce domaine sera certainement davantage développé dans les prochaines années.

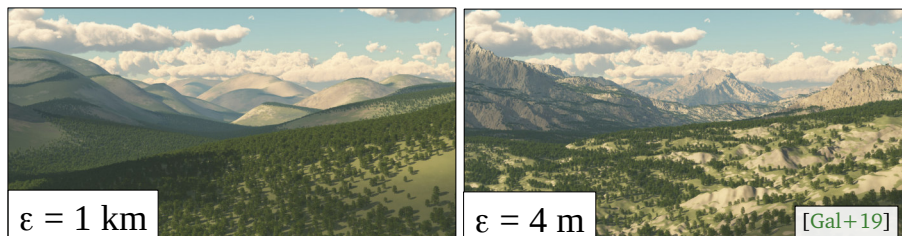


Figure 20 : L'arbre de construction éparse permet de représenter de grands terrains avec une basse résolution. Il permet également d'amplifier un terrain de basse résolution $\varepsilon = 1\text{km}$ en terrain haute résolution $\varepsilon = 4\text{m}$ par pixel. Le facteur d'amplification est alors de 256.

La modélisation éparse utilise les théories de *compressive sensing* pour encoder les signaux de la manière la plus parcimonieuse possible. Cette approche étudiée par GUÉRIN et al. [Gu16] a de nombreux avantages dont la représentation par arbre de construction éparse. Les arbres de terrain [Gén+15] sont constitués de patchs de terrains pour les feuilles et d'opérateurs de combinaisons pour les nœuds internes. La version éparse telle que présentée utilise des feuilles sur une grille régulière qui se superposent afin de ne pas laisser de zones vides. La combinaison des patchs se fait suivant une fonction de distance radiale. Chaque feuille représente alors un patch circulaire issu d'un dictionnaire créé à partir de terrains existants. L'objectif est de créer le dictionnaire le plus petit en limitant l'erreur de construction et de garder un nombre d'atomes petit.

La compression des données est une des applications puisqu'il suffit de stocker le dictionnaire ainsi que l'indice de l'atome pour chaque feuille dont le placement est implicite de par l'usage de la grille. Une version de dictionnaire procédural est proposée mais le réalisme de la scène tend à diminuer.

Cependant l'amplification est certainement l'application la plus importante. En créant un dictionnaire combinant des atomes haute résolution à leur version basse fréquence, il est possible d'améliorer la résolution d'un terrain en ajoutant des détails cohérents. L'arbre de construction est créé avec les atomes basse résolution qui sont par la suite remplacés par leur version haute résolution. Il est alors possible d'améliorer la résolution par 4 ou 8 à chaque remplacement (Figure 20) et d'itérer sur les nouveaux terrains.

ARGUDO et al. [Arg+17] proposent d'ajouter différentes informations aux atomes du dictionnaire. Ainsi, il est possible d'ajouter des informations sur l'humidité, le type de sol et la densité de végétation. Ces informations permettent d'ajouter du détail au terrain et d'ajouter des décorations mais elles favorisent également la cohérence globale de la scène en utilisant une analyse sur l'ensemble du domaine pour extraire, par exemple, des caractéristiques d'écoulement.

Les méthodes de modélisation parcimonieuse permettent de compresser les données de terrains mais également d'amplifier leur contenu. La création des dictionnaires est une étape importante pour garantir la variété dans la construction. L'utilisation de différentes informations permet de gagner en réalisme et en cohérence. Cependant, il n'est pas possible de créer des caractéristiques continues, comme les rivières, avec les méthodes actuelles.

2.2.3 Génération procédurale

Les méthodes procédurales utilisent souvent le mouvement brownien fractionnaire (fractional Brownian motion, m) [MVN68], qui est l'un des modèles procéduraux les plus utilisés du fait de sa simplicité à mettre en œuvre. Il peut aussi bien servir à synthétiser des schémas de subdivision que des marches aléatoires ou des fonctions de synthèse additive [Ebe+02].

Ces modèles reposent sur l'observation que les terrains comme les lignes de côtes et les montagnes érodées, présentent des structures dendritiques avec des propriétés fractales et donc des autosimilarités à différentes échelles. Des travaux précurseurs dans la modélisation de terrains se sont appuyés sur des modèles fractals qui permettent de produire des détails indéfiniment qui se ressemblent à chaque échelle.

De nombreuses techniques de génération procédurale utilisent la caractéristique d'autosimilarité des terrains, c'est à dire leur capacité à être statistiquement invariants au grossissement [Man82].

2.2.3.1 Génération par bruits

Les méthodes de génération procédurale de terrain par bruit définissent les élévations pseudo-aléatoirement en utilisant des bruits qui peuvent être de différentes natures. Il existe 3 grandes catégories de bruits présentés dans l'état de l'art de LAGAE et al. [Lag+10]. Les bruits de gradient sur des grilles dont les plus utilisés sont le bruit de Perlin [Per85] et le bruit de Simplex [Per01] génèrent le bruit par interpolation ou par convolution des valeurs aléatoires et/ou de leur gradient. Les bruits explicites comme les subdivisions stochastiques [FFC82b ; Mil86 ; MKM89] pré-calculent et stockent le bruit explicitement. Enfin les bruits de convolution éparse comme le bruit de Gabor [Lag+09] somment des noyaux de convolution de position et de poids aléatoires. Des bruits 3D ont également été développés [Per89 ; Wor96]. Pour plus d'informations sur les différents bruits, nous vous invitons à lire le livre de EBERT et al. [Ebe+02].

La combinaison de plusieurs octaves de bruits interpolés crée des terrains détaillés visuellement convaincants. Le mouvement brownien fractionnaire (*fractional Brownian motion* fBm) est une implémentation de plusieurs étapes de bruits dont les fréquences et les amplitudes évoluent selon une fonction donnée. La lacunarité permet de décrire l'évolution des fréquences et la persistance définit la variation de l'amplitude. Ces techniques sont très utilisées car elles sont simples à mettre en place et rapides à évaluer. Les paramètres permettent de générer des terrains variés, de grande taille et avec une précision infinie. Cependant, le contrôle utilisateur est global et non intuitif. De plus, aucune garantie sur le réseau de rivières n'est donnée.

Si on appelle n la fonction de bruit lisse définie sur \mathbb{R}^2 à valeur dans l'intervalle $[-1, 1]$, on a la fonction de turbulence :

$$t(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^{i=o-1} a_i n(\varphi_i \mathbf{p})$$

avec o le nombre d'octaves, a_i les différentes amplitudes et φ_i les différentes fréquences. En général, $a_i = a_0 p^i$ et $\varphi_i = \varphi_0 l^i$ avec $l \in [0, 1]$ la *lacunarité* et $p \in [0, 1]$ la *persistance*.

Le bruit exponentiel [Par15] permet de mieux distribuer les distributions de pentes. L'analyse de données réelles permet de contraindre la génération [LJ95 ; Par14 ; Par15].

Les fonctions n de bruits lisses ne permettent pas créer des lignes de crêtes (Figure 21 gauche). Un bruit r appelé *Ridge noise* a été utilisé pour produire des terrains avec des crêtes et des arêtes [Ebe+02]. Il est défini par $r(\mathbf{p}) = 1 - |n(\mathbf{p})|$.

Ces bruits sont mono-fractals et donc ne représentent pas les vrais terrains. Les terrains multi-fractals sont obtenus en pondérant les amplitudes des hautes fréquences a_{k+1} par une fonction α [Ebe+02].

$$t_{k+1}(\mathbf{p}) = \alpha(t_k(\mathbf{p})) a_{k+1} n(\varphi_i \mathbf{p}) + t_k(\mathbf{p}) \quad t_0(\mathbf{p}) = a_0 n(\varphi_0 \mathbf{p})$$

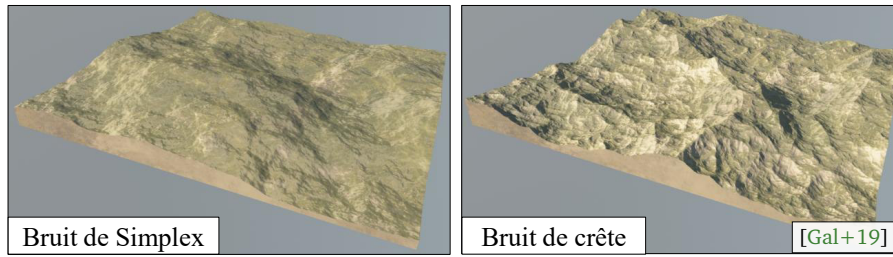


Figure 21 : Exemple de terrains obtenus à partir de 8 octaves de bruit de Simplex (à gauche) et bruit de crête (à droite). Le premier permet de créer des collines réalistes alors que le second est plus caractéristique des jeunes montagnes.

Les terrains multi-fractals sont donc plus lissés pour les zones de basses élévations et plus anguleux en haute altitude. Ce comportement permet d’imiter l’effet de l’érosion (Figure 22 gauche).

La structure de ces bruits peut mener à des artefacts de régularité. Ceux-ci peuvent être limités grâce à des transformations affines définies par $\omega : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$. Ainsi des translations et des rotations sont parfois appliquées à la création du terrain en appliquant $n \circ \omega(\mathbf{p})$ à la place de $n(\mathbf{p})$. Un comportement multi-fractal des fonctions de déformations est souvent utilisé (Figure 22 droite). Il permet de mieux approximer les effets de l’érosion [CB09].

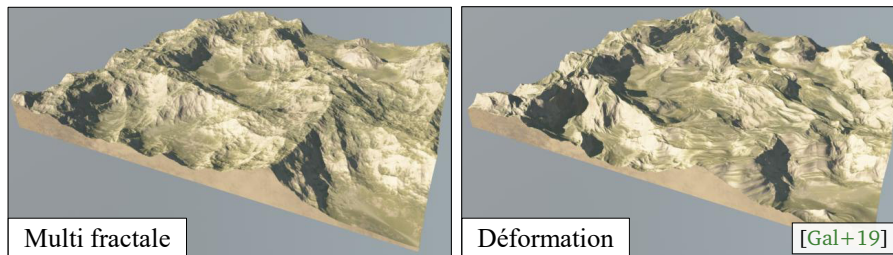


Figure 22 : Un terrain utilisant une somme multi-fractale de 8 octaves de bruit de crête (gauche) et ce terrain après déformation (droite).

2.2.3.2 Génération par subdivisions

D’autres travaux utilisent des schémas de subdivision pour raffiner le terrain [FFC82b]. Pour ces algorithmes, le but est de raffiner le terrain en ajoutant progressivement des points dont les hauteurs sont contrôlées par leur voisinage. Une composante aléatoire est ajoutée, mais décroît au fil des itérations. Différents schémas ont été développés [FFC82a ; Mil86 ; Lew87 ; DKW94] afin de limiter les artefacts visuels. Le plus célèbre est l’algorithme de Diamant-Carré (Figure 23).

Des adaptations sur GPU ont été proposées [BW06]. Ces techniques ont globalement les mêmes caractéristiques que les méthodes par bruits.

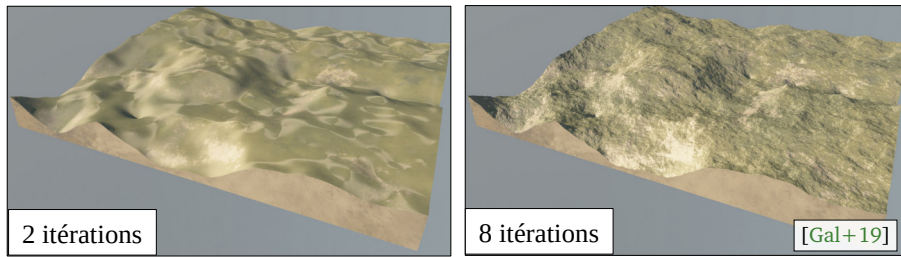


Figure 23 : Terrain généré avec l’algorithme de Diamant carré après 2 (gauche) et 8 (droite) itérations.

2.2.3.3 Génération par Fracturation ou Faulting

Une des premières méthodes de génération de terrain utilise les méthodes de faulting [Vos91 ; Ebe+02].

À partir d’un terrain plat, l’algorithme génère itérativement des fractures linéaires et aléatoires et élève les points en fonction de la ligne de fracture (Figure 24).

Soit $d(\mathbf{p}, \phi_i)$ la distance à une fracture ϕ_i et g une fonction d’interpolation sur un rayon R , telle que la quartique :

$$g(r) = (1 - (r/R)^2)^2 \text{ si } r < R \quad g(r) = 0 \text{ sinon}$$

On définit la fonction d’élévation comme la somme des influences des fractures, soit :

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^{i < n} f_i(\mathbf{p}) \quad f_i(\mathbf{p}) = a_i g \circ d(\mathbf{p}, \phi_i)$$

Les coefficients a_i représentent le déplacement aléatoire vertical utilisé pour chaque itération. Ils sont décroissants, ainsi l’était le paramètre des méthodes de subdivisions avec l’exposant de Hurst ($1/2^H, 0 < H < 1$) et ensuite $D = 3 - H$ est la dimension fractale. Puisque les lignes s’intersectent aléatoirement sur la surface, les sections seront de tailles différentes. Il est important que les fractures soient équi-probablement réparties sur les bords du terrain pour obtenir des reliefs réalistes.

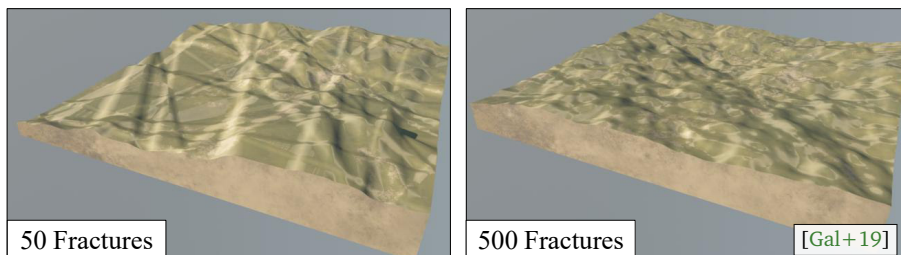


Figure 24 : L’algorithme par fracture génère aléatoirement des lignes qui permettent d’élérer et de rabaisser le terrain de part et d’autre de la ligne.

Cette méthode peut se généraliser à d'autres géométries de fractures comme les courbes et les cercles. Elle s'adapte à différentes tailles et permet de générer la géométrie de planètes fractales [FFC82b].

[KSU07] proposent une modification de l'algorithme pour contrôler la forme du terrain généré en utilisant des paramètres tels que la hauteur et les zones considérées.

2.2.3.4 Génération par caractéristiques locales

Les techniques de génération procédurale locale permettent de créer des caractéristiques spécifiques sur un terrain sans avoir recours à des simulations et sans exemples. L'objectif étant par exemple de créer des rivières ou des canyons. Ces éléments se situent à des endroits précis du terrain grâce à des courbes ou des points de contrôles.

Les méthodes de subdivision ne permettent pas à l'utilisateur de guider la création et de nombreux travaux ont essayé d'inclure dans le processus de génération un retour utilisateur.

HNAIDI et al. [HGA10] proposent un modèle fractal équipé d'un concept de détail comme celui présent dans les ondelettes. Il unifie le modèle IFS et un modèle classique utilisés en infographie pour déformer les objets à l'aide de points de contrôle. ARIYAN et al. [AM15] utilise le formalisme des subdivisions des graphes planaires en utilisant un algorithme de planification de trajectoire. Les courbes permettent de définir les hauteurs selon des profils établis et le reste du terrain est interpolé.

Les méthodes de construction par caractéristiques peuvent se faire selon des courbes ou selon des primitives.

Les méthodes de génération par courbes permettent de faire apparaître des caractéristiques linéaires comme les lignes de crêtes, les arêtes ou encore les rivières. Ces caractéristiques créées, elles se diffusent ensuite sur le reste du terrain.

Les constructions par primitives utilisent un modèle d'arbre hiérarchique inspiré des modèles de surfaces implicites pour placer les primitives et les combiner entre elles.

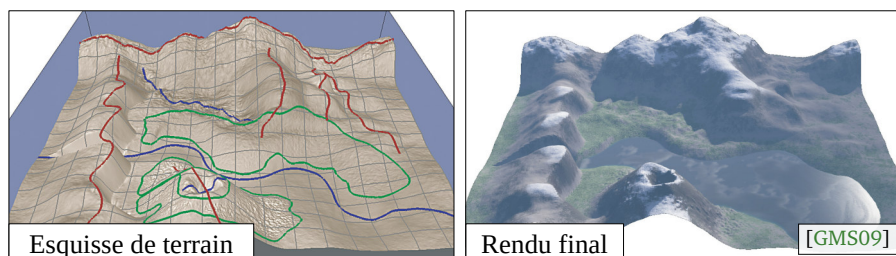


Figure 25 : La création de terrains par esquisse permet de créer des terrains variés. L'utilisateur peut définir les pics, les cascades ou encore les collines pour former le terrain final.

Le travail de GAIN et al. [GMS09] présente l'une des premières interfaces basées sur des croquis pour la modélisation interactive de terrains à partir de courbes de contrôle

(Figure 25). L'utilisateur spécifie les formes de relief, comme les montagnes et les vallées, au moyen d'une variété de courbes esquissées, y compris les lignes de base (représentant la projection d'une crête sur le plan du sol), les élévations (représentant la forme verticale d'une crête) et les limites (limitant la portée du relief des deux côtés de la ligne). Les élévations peuvent être esquissées comme des silhouettes d'un point de vue particulier, avec des contrôles supplémentaires pour indiquer comment elles s'intègrent par rapport aux formes de relief existantes. Chaque ensemble de courbes de base, d'élévation et de limites est soumis à un processus de déformation multi-résolution qui assure que le terrain est contraint de s'adapter aux courbes. Un aspect inhabituel est que les attributs de bruit de la courbe d'élévation dessinée sont analysés et utilisés pour ajouter le bruit correspondant au terrain local déformé. Cela signifie qu'une silhouette montagneuse dentelée induira des caractéristiques similaires sur le terrain environnant. Cette technique peut également être utilisée pour construire des terrains à partir de zéro ou modifier des paysages existants.

RUSNELL et al. [RME09] a utilisé une technique pour fusionner les courbes de caractéristiques définies par la combinaison d'une courbe d'élévation (définissant les crêtes) et d'un profil en coupe monotone décroissant (définissant les pentes de chaque côté de la crête). L'influence des caractéristiques peut varier d'une simple somme normalisée à une pondération qui favorise localement les courbes caractéristiques. L'aspect clé qui différencie ce système des systèmes euclidiens similaires basés sur la distance est que la distance est calculée efficacement sur la grille en utilisant l'algorithme du plus court chemin. Chaque nœud de réseau est connecté en bordure à ses huit voisins et le chemin le plus court est utilisé pour déterminer la distance à une courbe caractéristique, dont les sommets du réseau servent de générateur pour l'algorithme.

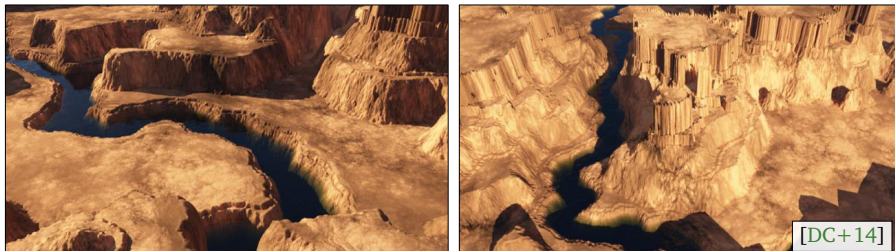


Figure 26 : Des paysages de canyon sont générés à partir de terrain de bruit. Une trajectoire de rivière est définie pour creuser dans les mesas.

Une méthode pour générer des paysages de canyon a été proposée par [DC+14]. À partir d'un terrain de bruits, des seuils permettent d'obtenir un terrain terrassé. Un algorithme de plus court chemin permet alors de créer les trajectoires des rivières et de créer les canyons (Figure 26).

Une méthode de génération utilise des courbes de caractéristique pour sculpter le terrain [Hna+10]. Ces courbes splines définissent l'élévation et les pentes à ses bords. Il est alors possible de représenter les crêtes et les rivières par leur squelette (Figure 27). Le modèle vectoriel, compact en mémoire, permet de définir la surface du terrain en utilisant des

équations de diffusion, contraintes par la pente, combinées à des fonctions de bruits. Une implémentation multi-grille sur GPU permet une génération interactive mais de taille limitée par la mémoire.

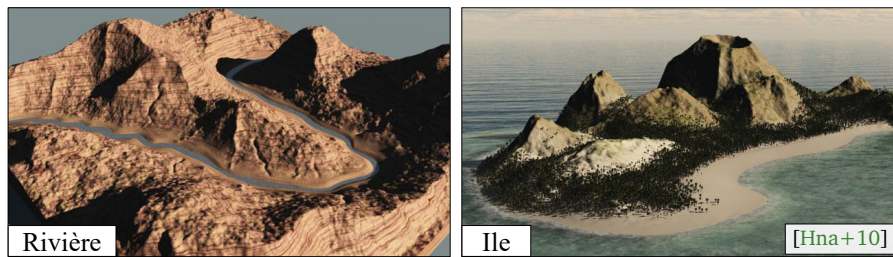


Figure 27 : Une rivière et une île sont générées à partir de courbes de caractéristique définies par un artiste. Le relief est alors généré en utilisant les équations de diffusion.

Les méthodes de bruits procédurales ne permettent pas localement de modifier les terrains et une approche inspirée des surfaces implicites et de la géométrie constructive solide propose un arbre de construction hiérarchique pour définir localement le terrain à partir de primitives à support compact et d'opérateurs [Gén+15]. Chaque primitive permet de représenter une caractéristique de terrain particulière telle que des collines, des montagnes ou encore des rivières à l'aide d'une fonction d'élévation. Elles sont associées à une fonction de poids qui est utilisée par les différents opérateurs pour assembler les primitives lorsqu'elles se superposent et assurer une continuité dans le terrain. Les primitives courbes sont utilisées pour représenter les caractéristiques continues comme les rivières et les routes (Figure 28). Ce modèle permet d'éditer facilement le terrain et est léger en mémoire. Bien que cette représentation puisse être utilisée par un artiste, plusieurs techniques de génération utilisant ce modèle ont été proposées. Une méthode de génération crée un réseau d'écoulement et des connaissances en géomorphologie pour créer le terrain [Gén+13]. Une autre méthode, d'amplification et de génération, utilise les techniques de compression éparse [Gu16].



Figure 28 : Un arbre de construction hiérarchique combine des disques de montagne et de colline à des courbes de routes (gauche) ou de rivière (droite) pour représenter les terrains.

GÉNEVAUX et al. [Gén+13] proposent une méthode de génération de terrain, utilisant l'arbre de construction hiérarchique, à partir d'un réseau hydraulique généré procéduralement (Figure 28 gauche). L'utilisation de connaissances géomorphologiques comme le nombre de Horton-Strahler [Hor45], représentant la complexité des affluences d'une rivière, garantit le réalisme du réseau. Le terrain est alors divisé en utilisant le diagramme de Voronoi pour définir les crêtes et les différents bassins versant. La corrélation avec la classification de

Rosgen [Ros94] permet de définir des profils types de rivière et de générer le terrain sur son ensemble.

Les méthodes de générations procédurales volumiques ne sont pas très développées. Elles utilisent généralement une modélisation implicite [GM01 ; Pey+09a ; Bec+17 ; Bec+18].

GAMITO et al. [GM01] déforment continûment la surface d'un terrain, représenté par une fonction d'élévation $f(\mathbf{p})$, à l'aide d'un champ vectoriel de déformation ω^{-1} . Le terrain 3D obtenu ne sera pas auto-intersecté et la surface du terrain est définie par :

$$\mathcal{S} = \{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3 \mid f \circ \omega^{-1}(\mathbf{p}) = 0\}$$

Les déformations permettent de définir des surplombs et la fonction ω^{-1} proposée utilise une somme de fonctions de bruit 3D sur un support compact.

L'utilisation de piles de matières combinées à une représentation implicite permet de définir un terrain avec des arches (Figure 29) et des surplombs [Pey+09a]. L'extraction de la surface est cependant complexe et une méthode d'extraction adaptative permet d'accélérer le processus [SBD13].

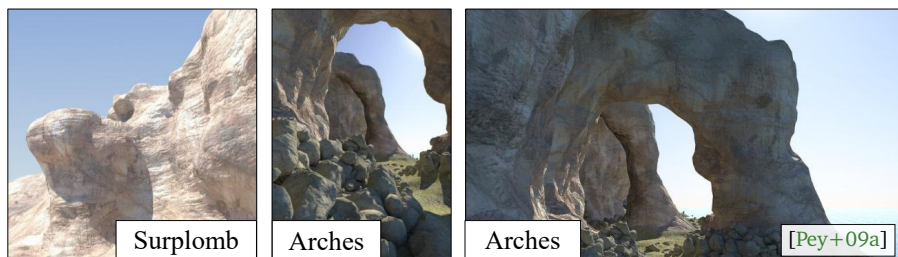


Figure 29 : La représentation hybride entre des piles de matières discrètes et des surfaces implicites permet de générer des arches et des surplombs.

Les courbes de caractéristiques [Hna+10] sont utilisées afin de générer un terrain 3D avec des arches et des surplombs [Bec+17 ; Bec+18] (Figure 30). L'utilisateur crée les courbes de caractéristiques avec des informations sur les surfaces tangentes et un bruit procédural. Une discrétisation de l'espace permet alors une représentation éparsée des contraintes du modèle permettant une étape de diffusion du bruit et du champ de surface. Cette dernière permet alors d'extraire la surface du terrain. Une implémentation GPU permet d'accélérer le traitement et par conséquent il est possible d'utiliser cette méthode pour une création interactive sur une grille de 128^3 voxels.

2.2.4 Conclusion

Les méthodes de génération procédurale ont été grandement étudiées pour générer de très grands terrains. Ces méthodes sont en effet rapides à calculer, légères en mémoire et permettent une échelle de détail infinie. Cependant elles ne permettent pas de créer l'ensemble

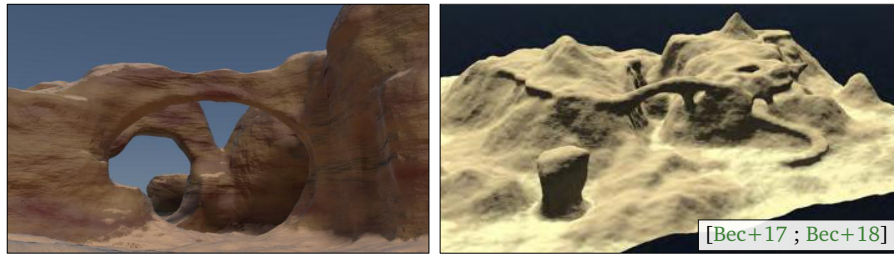


Figure 30 : Les courbes de caractéristiques 3D permettent de définir des terrains comportant des arches.

des caractéristiques des terrains existants et surtout elles ne garantissent pas une structure réaliste des terrains. Il est notamment difficile de garantir un réseau d'écoulement réaliste et les techniques d'érosion hydraulique sont souvent utilisées comme un post-traitement. De plus, ces méthodes ne permettent pas de contrôler localement le terrain et il est difficile de manipuler les paramètres des bruits procéduraux pour obtenir des résultats proches de l'attente de l'utilisateur.

Les bruits pour générer des terrains combinés avec des techniques de déformations permettent de créer de la diversité. Aussi l'indépendance de l'évaluation des hauteurs a permis une implémentation sur GPU et une création interactive. Ces méthodes sont donc historiquement très utilisées dans l'industrie. Les méthodes par subdivision bien que plus faciles à manipuler sont moins utilisées dans l'industrie. Cela peut s'expliquer par le manque de caractéristiques qu'il est possible de représenter.

Différentes techniques se sont intéressées à ces contraintes d'édition et de manque de structure globale, ainsi, certaines permettent de contrôler localement le processus de subdivision et d'autres mélangent différentes caractéristiques fractales pour donner du réalisme. Des méthodes par création de caractéristiques locales ont également été proposées pour générer intuitivement les terrains. Les créations utilisent alors des informations clés pour représenter l'ensemble du terrain. Cependant la génération de la surface à partir de ces informations vectorielles est un problème difficile et différentes approches ont été proposées. Les méthodes par diffusion permettent de générer des terrains lisses mais il est difficile de créer du détail. L'approche par arbre de construction permet de créer des types différents de relief mais sa création peut être ardue. Les opérateurs permettent d'obtenir un terrain continu cependant ils peuvent parfois lisser les caractéristiques que l'on souhaite observer. Bien que des techniques de placement automatique aient été proposées, ce problème reste ouvert.

2.3 Génération des réseaux hydrauliques

Les rivières ont un impact important sur les terrains. Elles structurent les différents reliefs en assurant l'écoulement de l'eau sur le terrain. Ainsi l'analyse du réseau permet de valider le

réalisme du terrain. L'action de l'eau sur le terrain a rapidement été étudiée en informatique graphique pour la génération de mondes virtuels.

Les rivières se caractérisent par une dynamique de taille très importante. Les réseaux font souvent des centaines de kilomètres et ont des caractéristiques visuelles précises à la taille d'une goutte d'eau. Ainsi pour animer l'eau, le lit de la rivière doit être très détaillé. Différentes techniques de modélisation existent en fonction de l'objectif à réaliser.

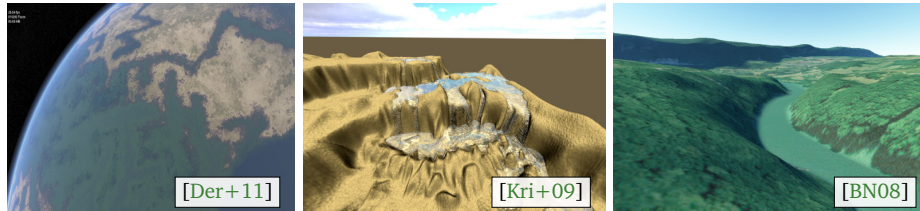


Figure 31 : Les méthodes de génération de rivières peuvent se faire à différentes échelles. De gauche à droite, le réseau entier des rivières est créé, l'érosion forme des vallées et enfin le lit de rivière est détaillé.

Nous proposons un découpage des méthodes de génération suivant trois échelles (**Figure 31**) : La première permet de générer un graphe de rivières dans son ensemble et influence le terrain dans sa globalité. La seconde permet de sculpter les paysages et a une influence au niveau des vallées. Elle ne permet pas de définir le lit de rivières précisément et donc ne peut pas être utilisée pour animer l'eau par simulation. La dernière échelle permet de modéliser précisément les lits de rivières afin de pouvoir simuler l'écoulement de l'eau. Il n'existe cependant aucune méthode pour créer simultanément les lits des rivières et l'animation de l'eau.

Alors que les méthodes par simulation numérique de l'eau permettent de créer par définition des réseaux réalistes [MKM89 ; BF02], différentes méthodes de génération par contraintes ont été proposées pour contrôler la génération du réseau hydraulique [ST89 ; Pou+04 ; SS05 ; Bel07].

2.3.1 Réseau de rivières

Seulement quelques années après les premières méthodes de génération de terrains, KELLEY et al. [KMN88] proposent une méthode de génération de vallée utilisant une méthode empirique d'érosion hydraulique, issue de la géomorphologie. Ce modèle assure ainsi un réseau de rivières cohérent. Un squelette du terrain 3D sous la forme d'arbre est créé pour générer le terrain. Chaque nœud contient des informations sur le réseau comme son aire de drainage ou son nombre de Shreeve, qui qualifie la profondeur du nœud dans l'arbre. Au départ, une branche est créée pour former la vallée avec un nombre de Shreeve de 1. Une construction itérative commence, elle subdivise les segments présents et ajoute d'autres arêtes, appelées *tributary*, à l'arbre. Ces étapes utilisent des règles de géomorphologie, comme les angles

de jonction de Howard, afin de définir les longueurs des segments et les angles entre les différentes branches de rivières. Le squelette 3D étant construit, le terrain est créé en utilisant une surface de tension [NF84] (Figure 32). Cette méthode est rapide et permet de générer de grands réseaux. L'utilisation de cette méthode permet également de générer des vallées réalistes. Cependant, un seul arbre peut être créé et il n'est pas possible de représenter des réseaux distincts. De plus, la surface de tension ne permet de créer que des surfaces lisses. Aussi aucun lit de rivière n'est défini.

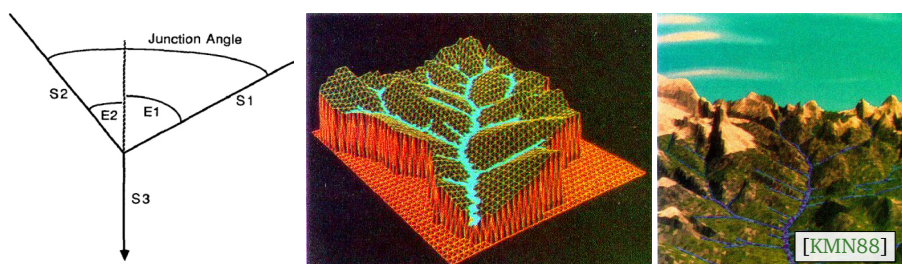


Figure 32 : Les informations géomorphologiques, comme les angles de jonction de Howard (gauche), permettent de générer un réseau 3D de rivières cohérent. Des surfaces de tension permettent alors de définir les hauteurs du terrain.

Par la suite, PRUSINKIEWICZ et al. [PH93] proposent une méthode de création conjointe du réseau de rivières et de la montagne en utilisant la méthode par déplacement du point médian [FFC82b] et le modèle de courbe sinueuse [Man88]. D'un côté, la méthode de subdivisions utilise un schéma par triangles qui se subdivisent en modifiant aléatoirement l'élévation des nouveaux points. De l'autre la méthode de génération de trajectoires sinueuses utilise le même schéma de subdivision pour créer une courbe fractale représentant le réseau hydraulique. À chaque itération, les segments qui relient deux côtés d'un triangle sont découpés en une ligne brisée reliant les bords des nouveaux triangles (Figure 33). Cette méthode permet de créer des embranchements. Pour créer le terrain, lors de la subdivision des triangles, les

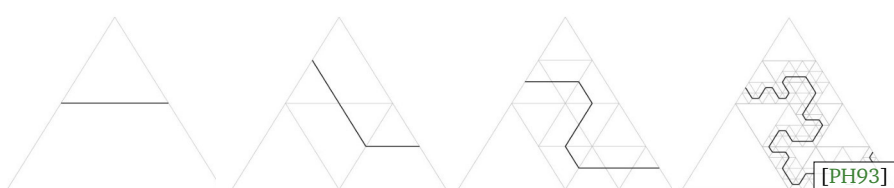


Figure 33 : Schéma de subdivision triangulaire pour créer une trajectoire sinueuse.

nouvelles élévations adjacentes à la trajectoire de la rivière sont contraintes. Cette technique permet ainsi de créer des montagnes fractales avec un réseau de rivières. Cependant, cette méthode ne permet pas de contrôler la forme des vallées créées et le respect des règles de géomorphologie liant la pente et la sinuosité. Cette méthode permet davantage de créer de grandes rivières plutôt qu'un réseau complet. La trajectoire de celle-ci est définie et le terrain autour est construit, cependant aucun lit de rivière n'est créé. De plus, des artefacts peuvent apparaître lors de la création du relief (Figure 34).

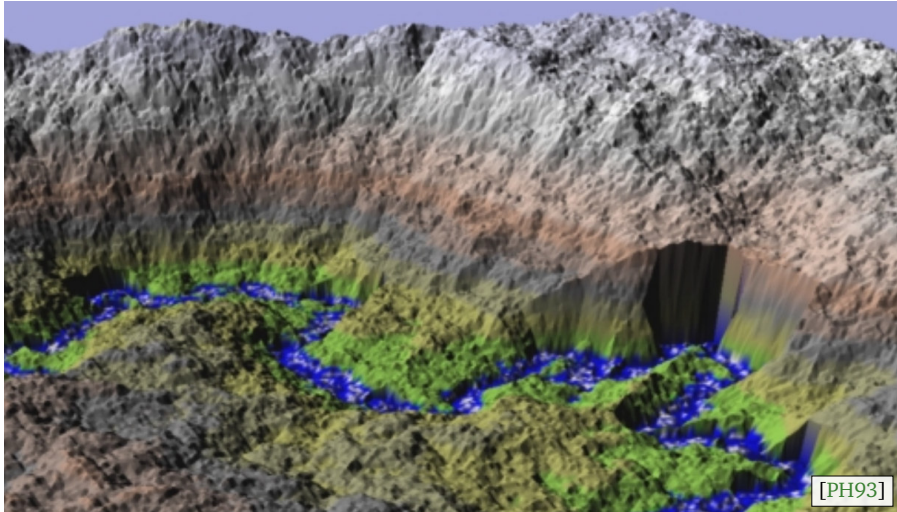


Figure 34 : Le terrain est formé en utilisant un schéma de subdivision et une trajectoire sinueuse pour modifier les élévations. Des artefacts peuvent apparaître.

La génération d'un terrain en utilisant le réseau hydraulique à l'échelle planétaire est proposée par DERZAPF et al. [Der+11]. À partir d'une géométrie de planète basse résolution, un ensemble de continents est généré avec des réseaux hydrauliques. La génération et la visualisation du terrain, sur carte graphique, sont interactives. La géométrie visualisée est adaptative (Figure 35). La méthode garantit que tous les réseaux hydrauliques mènent à la mer, que le réseau hydrographique est entouré de vallées, de montagnes et de collines et enfin que les rivières ne s'intersectent pas et suivent la plus grande pente jusqu'à la côte. Leur algorithme, en deux phases, commence par créer une sphère avec des continents et un réseau hydraulique. Il permet ensuite une visualisation adaptative en temps réel. Le monde généré définit en

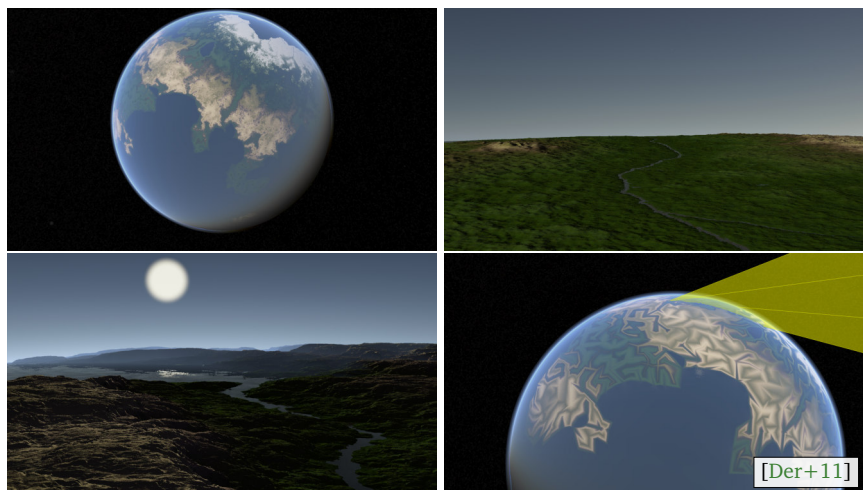


Figure 35 : Génération et visualisation adaptative d'un monde à l'échelle planétaire. (De gauche à droite, de haut en bas) Le terrain peut être observé depuis (1) l'espace, (2) un avion ou encore (3) à la première personne. (4) La caméra observe la zone en jaune, le reste du terrain à la résolution de base.

tout point l'élévation du terrain et celui de l'eau. Une méthode par subdivision permet de

faire apparaître des continents avec des embouchures, puis le réseau de rivières est défini pseudo-aléatoirement suivant le maillage obtenu. Commence alors la partie de visualisation qui subdivise le maillage interactivement en s'assurant que le terrain soit reproductible. Le lit de la rivière est défini en abaissant les points de rivières et l'eau comme un second maillage sur l'ensemble de la planète qui est parfois au-dessus du terrain, parfois en dessous. Cette méthode permet de générer une planète avec un réseau d'écoulement cependant les lits des rivières ne sont pas définis de manière précise.

TEOH [Teo09] proposent une méthode procédurale de génération de terrain en créant un réseau de rivières. Les chemins de la rivière sont créés de manière stochastique (Figure 36) et ne correspondent à aucune règle observée en géomorphologie. Cela génère des réseaux hydrauliques et des bassins versants non cohérents. De plus le contrôle utilisateur est limité à des paramètres n'ayant pas de signification pratique.

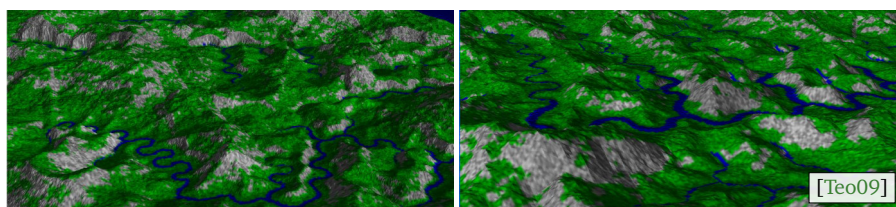


Figure 36 : À partir d'un terrain peint par un utilisateur, un réseau de rivières fractal est calculé pour définir la topologie du terrain.

GÉNEVAUX et al. [Gén+13] proposent une méthode procédurale utilisant des connaissances de géomorphologie pour générer un terrain contenant un réseau hydraulique réaliste (Figure 37). Le réseau de rivières est créé en utilisant une approche par colonisation à partir de points d'embouchure. Le réseau, représenté par un graphe planaire géométrique, s'étend suivant un algorithme probabiliste et une grammaire. L'utilisateur a à disposition différents outils de contrôle et d'édition. Il peut notamment définir une carte approximative des pentes, définir les contours du terrain, déterminer les longueurs optimales des rivières ou encore esquisser des trajectoires d'écoulement. Ces paramètres sont intuitifs et permettent d'avoir du contrôle local. Il permet de contraindre les pentes, la sinuosité locale des trajectoires et les coupes transversales. Les connaissances de géomorphologie permettent de créer le terrain avec un lit de rivière réaliste. Pour la création du terrain, l'arbre de construction de terrain [Gén+15] est utilisé pour former le relief global mais également le lit des rivières. Celui-ci est défini par des primitives courbes utilisant des fonctions ou alors des images. Ces éléments sont approfondis section 3.1. Cette méthode permet de générer un terrain réaliste grande échelle autour du réseau hydraulique, les connaissances en géomorphologie garantissant la cohérence de la création. Les résultats permettent de visualiser les résultats à une échelle assez grande mais pas d'animer de l'eau sur les lits de rivières.

Les méthodes de génération contraintes permettent aux utilisateurs de définir par esquisses des caractéristiques de terrain. Certaines méthodes utilisent la génération par l'exemple [Zho+07],

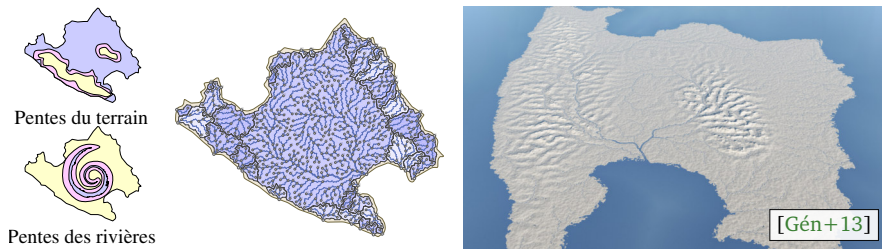


Figure 37 : La génération du terrain par création du réseau hydraulique permet un contrôle basé sur la pente.

d'autres par apprentissage [Gué+17] ou encore en utilisant des fonctions de distance [RME09]. Elles ne garantissent pas l'écoulement.

Les méthodes qui permettent de modéliser les réseaux dans leur ensemble permettent de modifier ou créer un terrain avec des rivières. Elles ne permettent cependant pas de créer du détail fin ni d'animer l'eau.

2.3.2 Vallées

La génération du réseau complet de rivières ne permet pas toujours de créer le détail des vallées. À ce titre, des méthodes spécifiques permettant de générer la géométrie des vallées ont été développées. Elles peuvent se diviser entre les techniques par esquisses qui permettent de créer les vallées à partir des traits de l'utilisateur ou les techniques par simulation qui permettent d'amplifier un terrain existant peu détaillé.

Les méthodes permettant de créer des caractéristiques locales ont été développées **partie 2.2.3.4** et nous verrons ici, comment elles permettent de générer un réseau hydraulique. L'utilisation de courbes vectorielles dessinées par un artiste [GMS09 ; Hna+10 ; BA05a ; Bel07 ; TB18] ou obtenues grâce à un algorithme de plus court chemin [DC+14] permet de générer des terrains sous contraintes (Figure 38). Le contrôle utilisateur est important et permet des créations non réalistes. Ces approches permettent de créer des terrains de grandes tailles avec un lit de rivière. Cependant ces approches ne permettent pas de générer du détail dans la géométrie créée ou alors avec une intervention humaine très importante. De plus, le réalisme du réseau dépend des esquisses utilisateur et ne permet pas de garantir un écoulement réaliste. Ces méthodes ne sont pas spécifiques à la génération des rivières et donc ne permettent pas d'animer l'écoulement de l'eau ni de générer automatiquement du détail cohérent dans la géométrie du lit de la rivière.

Créer des vallées sur une carte existante peut se faire en utilisant des algorithmes d'érosion hydraulique. Ces méthodes sont détaillées **sous-section 2.2.1**, aussi nous nous limitons à l'analyse de ces méthodes pour générer un réseau de rivières sur un terrain. Un premier support faiblement détaillé est créé avant la simulation afin de contrôler l'allure globale. MUSGRAVE et al. [MKM89] proposent en premier un modèle d'érosion thermique et hydraulique pour des

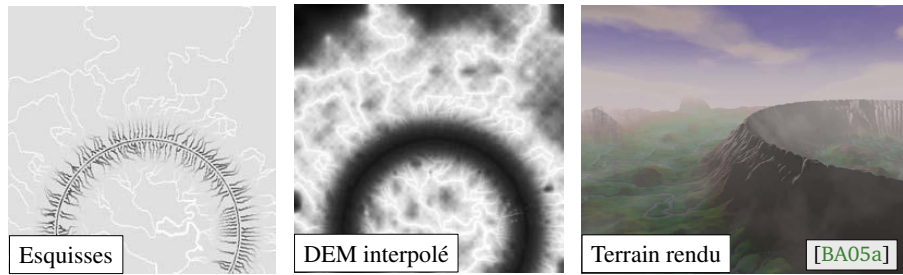


Figure 38 : Terrain avec un réseau de rivières obtenu par subdivisions contrôlées à partir d'esquisses interpolées.

terrains fractals. Le terrain forme alors des canaux de rivières car à chaque pas de la simulation, de l'eau tombe sur le terrain, forme des lacs puis par débordement, l'eau s'écoule pour creuser le réseau hydrographique. Ces méthodes ont été reprises pour ajouter du réalisme : en ajoutant différentes couches de matières [BF01a], en proposant une implémentation sur GPU [BF01b ; MDH07 ; Van+11], en ajoutant la dissolution des sols et l'évaporation [BF02], en utilisant une approche particulière [CMF98 ; Kri+09 ; Šř08], en utilisant un modèle entièrement 3D [Ben+06], en proposant une érosion temps réel [Ben07], en l'appliquant sur des objets [Woj+07]. NAGASHIMA [Nag98] s'est intéressé à la formation des vallées sur les

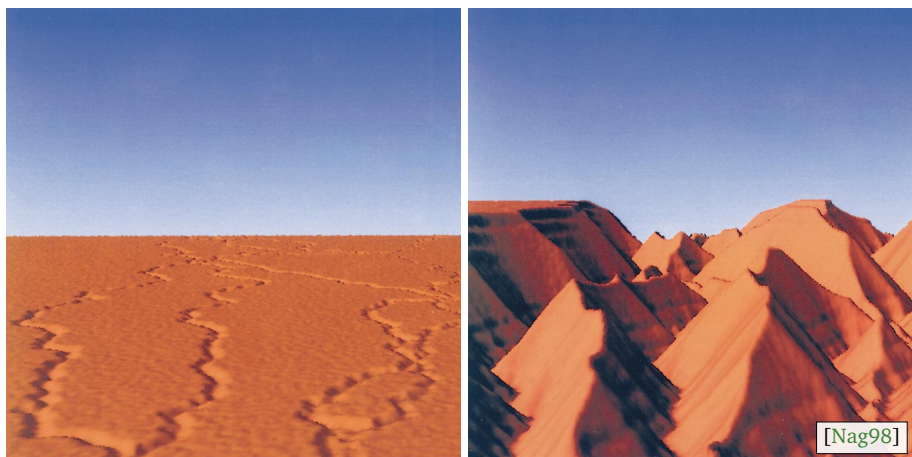


Figure 39 : À partir d'un terrain où un réseau est esquissé, la simulation permet de générer des vallées avec un écoulement réaliste.

terrains en utilisant la simulation (Figure 39). Bien que de nombreuses méthodes se soient intéressées à ce problème, les méthodes de simulation sont difficiles à contrôler et passent en général par un contrôle indirect en utilisant différents matériaux. De plus les simulations ne permettent pas de générer de grands terrains avec un grand niveau de détail. Les vallées sont creusées mais ne permettent pas de dessiner de manière fine les lits de rivières, de par la résolution utilisée pour la simulation. Ces méthodes modifient globalement le terrain, sans analyse, et ne permettent pas de sculpter simplement le lit d'une rivière. Aussi, bien qu'une simulation d'eau soit appliquée, ces méthodes ne sont pas faites pour créer l'animation de l'eau.

2.3.3 Lits de rivière

Les méthodes précédentes définissent le réseau de rivières et de générer de manière grossière les vallées où s'écoulent celles-ci. Elles ne permettent cependant pas la formation des lits de rivières. Les méthodes de creusement de rivières demandent généralement une édition manuelle importante. Ces méthodes permettent d'amplifier un terrain existant en ajoutant un réseau de rivière.

Des méthodes de simulation de creusement de lit de rivières ont été proposées dans le cadre des géosciences [SMK13] mais ne sont pas détaillées dans notre rapport car elles ne sont pas destinées à créer des lits de rivières pour l'informatique graphique.

BRUNETON et al. [BN08] proposent une méthode d'édition et de visualisation de terrain comportant des rivières. Des données vectorielles, sous la forme de surfaces et de courbes, caractérisent les éléments du terrain. Un shader spécialisé pour chaque type de donnée définit alors son apparence et son effet sur le terrain. Cette méthode permet de visualiser en temps réel de très grands terrains avec un bon niveau de détails grâce à une implémentation GPU et à une structure quadtree dépendant de la caméra. L'utilisation de shader spécifique rectifie les élévations des caractéristiques définies, ainsi les lits de rivières sont visualisés sans déformation due aux interpolations (Figure 40). Le rendu est alors temps réel. Pour représenter les rivières

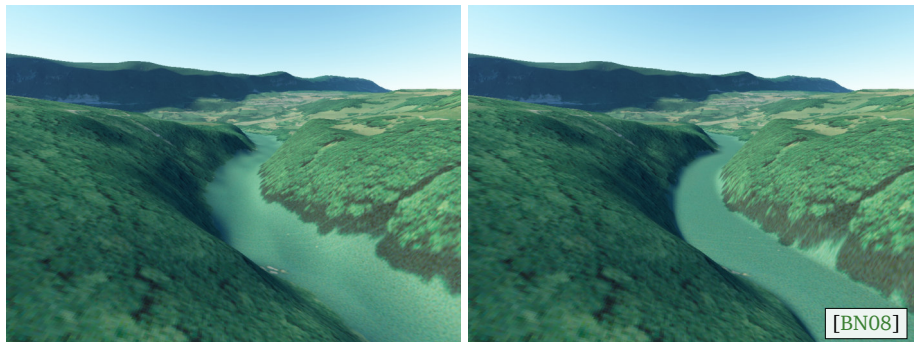


Figure 40 : Un très grand terrain comportant des erreurs d'élévation sur son réseau hydraulique peut être visualisé en temps réel avec les élévations corrigées.

finies, une courbe de Bézier 2D, une largeur de lit et une largeur d'empreinte (plus large que le lit) permettent de reconstruire la géométrie de la rivière. Dans le cas de rivières de grandes tailles, une courbe fermée pouvant contenir des trous est utilisée avec la largeur d'empreinte. Il est possible de définir un profil d'élévation le long d'un axe. Le terrain est modifié pour correspondre à la courbe de profil ou alors à une élévation donnée. La largeur d'empreinte permet de progressivement interpoler le terrain d'origine avec le terrain modifié. La trajectoire en z des rivières est modifiée pour assurer la cohérence. Une fois les données vectorielles créées, il est facile d'éditer le terrain. Cette méthode ne permet pas de générer un réseau hydrographique ni de créer un lit de rivière détaillé. Elle permet de représenter de manière vectorielle un réseau de rivières, de le modifier et de le visualiser en temps réel. Il n'est pas possible d'utiliser le lit des rivières pour animer de l'eau.

EMILIEN et al. [Emi+15] s'intéressent aux chutes d'eau et leurs abords. Ils proposent un éditeur interactif pour ajouter un graphe de rivières comportant des cascades sur un terrain. À partir d'esquisses vectorielles de l'utilisateur pour exprimer le graphe hydraulique et la nature de certains éléments clés, un réseau réaliste est défini sur le terrain. Des mécanismes pour ajouter des méandres sur les zones planes par la méthode du déplacement du point central ou des surplombs au niveau des chutes permettent d'améliorer le réalisme de la scène. Le lit géométrique des rivières et les bassins de réception des chutes d'eau sont alors sculptés dans le terrain (Figure 41). À partir d'un terrain existant et d'un graphe hydraulique de contrôle, la géométrie et l'animation des cascades sont générées. Cette méthode permet donc de créer une animation pour de l'écoulement rapide et les cascades en 3D, cependant, elle ne s'applique pas à l'ensemble des rivières. De plus, la formation des lits de rivières n'est pas réaliste.



Figure 41 : Modification d'un terrain existant pour créer un réseau de rivières avec des cascades.

GÉNEVAUX et al. [Gén+15] génèrent des lits de rivières pour l'arbre de construction hiérarchique. Pour cela des primitives spécifiques sont définies. Des primitives construisent le relief le long de courbes 3D grâce à des profils utilisateur. Des primitives images dans des quadrangles ou le long d'une courbe permettent de créer les embranchements et l'élévation de primitives complexes. Ces primitives s'intègrent dans le terrain grâce à l'arbre de construction et aux opérateurs de combinaison. Ce modèle est utilisé dans l'algorithme de création de terrain en utilisant un réseau hydrographique [Gén+13]. Le modèle de rivières permet de créer procéduralement des lits de rivières lisses par primitives courbes ou alors repose sur l'utilisation de données réelles ou créées par un artiste. Il est plus difficile de contrôler une primitive complexe plutôt qu'un ensemble de primitives simples et le lit n'est pas suffisamment détaillé pour utiliser une simulation d'eau. De plus, le modèle ne propose pas d'animation d'eau pour son modèle.

2.3.4 Conclusion

La génération d'un réseau hydrographique sur un terrain a été étudiée pour différentes échelles. Certaines méthodes permettent de générer des réseaux de rivières sur l'ensemble du terrain mais celles-ci ne permettent pas d'animer de l'eau sur la géométrie de la rivière. D'autres méthodes, sur de plus petits domaines, se sont intéressées à la génération de certaines caractéristiques des rivières ou alors utilisent les rivières pour corriger leur terrain. Des techniques peuvent permettre de modéliser des lits de rivières cependant les méthodes de

génération ne sont pas automatiques et ces méthodes ne sont pas spécifiquement développées pour les rivières. Elles ne garantissent pas un écoulement réaliste. Les techniques de simulation sont difficiles à contrôler, nécessitent un terrain d'origine suffisamment détaillé pour permettre un écoulement et ne peuvent pas être utilisées sur de très grands domaines malgré de nombreux travaux pour accélérer les calculs. De plus ces méthodes ne permettent pas de générer un lit de rivières à proprement parler.

2.4 Animation de l'eau des rivières

L'eau directement visible à la surface de la terre s'appelle eau de surface et se divise en différentes catégories en fonction de la nature de l'eau (minéraux ou composants biologiques), de son activité et de sa taille. Les eaux superficielles peuvent se diviser en trois grandes catégories :

- les océans et les mers,
- les étendues d'eau stagnantes ou quasi-stagnantes (lacs, marais, flaques),
- les cours d'eau (rivières, torrents, fleuves, cascades...).

La modélisation de l'eau a commencé à être étudiée au début des années 1980 [Sch80 ; Max81] et reste un domaine de recherche important encore de nos jours. L'état de l'art de IGLESIAS [Igl04] relate l'évolution des méthodes d'animation de l'eau, celui de DARLES et al. [Dar+11] se concentre sur la modélisation des océans. Enfin BRIDSON [Bri15] se concentre sur la simulation de fluide. LEVY [Lev18] propose une introduction à la simulation de fluide récente qui permet de cerner les différents enjeux de la simulation de fluide actuellement.

Les principaux obstacles sont la *modélisation*, le *rendu*, l'*échelle* et enfin le *temps de calcul*.

Nous nous intéressons essentiellement aux modélisations de l'eau qui s'adaptent à un usage pour les rivières. La particularité des rivières se présente comme une interface entre le lit de la rivière et l'eau complexe. La géométrie de la rivière implique des hauteurs d'eau variables mais aussi des phénomènes spécifiques à l'eau qui sont complexes et fréquents tels que les tourbillons ou les chutes d'eau. Ces caractéristiques complexes s'expliquent par de nombreuses transitions entre des écoulements laminaires et des écoulements turbulents (caractérisés par le nombre de Reynolds). L'animation de l'eau, dans ce cadre, est fortement dépendante du profil et de la trajectoire de la rivière et une attention particulière à ceux-ci sera nécessaire aussi bien pour les méthodes de simulation que pour les animations procédurales.

2.4.1 Simulations

Les méthodes de simulations qui utilisent les équations locales des fluides peuvent en théorie modéliser n'importe quel type de fluide. Les équations de *Navier-Stokes* sont les équations les

plus connues de la dynamique des fluides. Il n'existe pas de solution analytique à ces modèles et il est nécessaire d'itérer pour obtenir l'animation de l'eau. Les rivières peuvent mesurer des dizaines de kilomètres, il est alors nécessaire de faire des compromis entre la précision de la simulation, les temps de calcul et la surcharge mémoire. Pour obtenir des résultats convaincants, il est également nécessaire d'avoir des lits de rivières très bien définis, ce qui est rarement le cas avec des cartes d'élévation dont la résolution est constante sur l'ensemble du terrain. Nous présentons une introduction aux simulations d'eau orientées rivières mais nous ne détaillerons pas l'ensemble des méthodes de simulation.

La simulation de fluide consiste à caractériser les fluides à un temps donné et à une position donnée. Il s'agit donc de fonctions $q(\mathbf{p}, t)$ qui définissent certaines grandeurs. Deux familles de méthodes en découlent : les méthodes eulériennes qui s'intéressent à l'évolution de la grandeur q à un point \mathbf{p} donné et qui utilisent souvent des grilles régulières et les méthodes lagrangiennes qui suivent l'évolution de la grandeur q pour de petits éléments se déplaçant, appelés particules, créant des particules données. On appelle cela l'advection.

Les premières méthodes de simulation utilisaient des cartes de hauteur pour simuler des vagues [KM90 ; CL95 ; Che+97]. Le modèle mathématique de MOLLs et al. permet de modéliser l'animation de l'eau des rivières sur un petit domaine. Des modèles 3D des équations de Navier-Stokes ont ensuite été développés pour les grilles Eulériennes [FM96 ; Sta99]. Le rendu est possible à l'aide des surfaces implicites [FF01 ; EMF02]. L'utilisation de grilles adaptatives permet d'améliorer les performances mais toujours loin du temps réel [LGF04 ; Irv+06].

Les méthodes Lagrangiennes sont efficaces et permettent d'obtenir beaucoup de détails sur la surface de l'eau. Elles peuvent également être utilisées pour modéliser des cascades. Elles sont donc adaptées à l'animation des rivières. Il est cependant plus difficile de reconstruire la surface de l'eau.

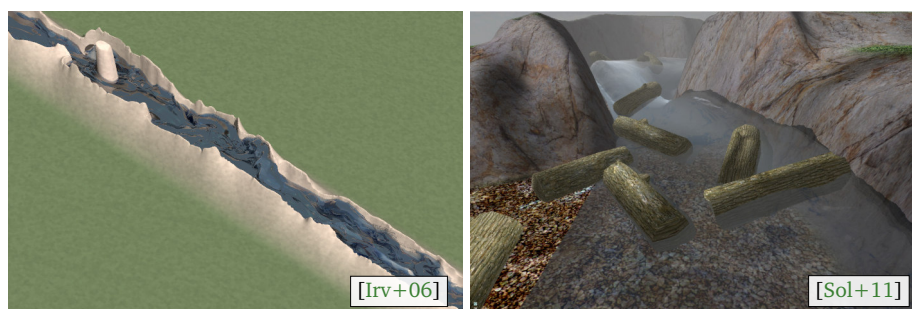


Figure 42 : (Gauche) La simulation d'une rivière remplissant un canyon sur une grille (2000×200) prend 20 min par image. (Droite) Les méthodes combinant les SPH et les équations en eau peu profonde permettent une animation de l'eau sur de petites sections de rivières en temps réel.

[MCG03] utilise les particules hydrodynamiques pour simuler l'animation de l'eau. Quelques méthodes contournent les problèmes du temps de calcul en optimisant le processus de simulation. On citera des méthodes hybrides entre les équations en eaux peu profondes et de

SPH [LP02 ; LH10 ; Sol+11] (Figure 42). Une méthode pour les rivières utilise des particules éparses sur GPU [KW06]. Cependant pour être interactive cette méthode diminue le nombre de particules et la géométrie de la rivière perd en détails. Des systèmes multi-résolutions sont proposés pour privilégier le détail sur la surface de l'eau et limiter la résolution en eau profonde [Irv+06 ; NB11 ; WHK17].

Certaines méthodes utilisent des approches hybrides pour la simulation d'eau afin de la rendre plus rapide [TG01]. MAES et al. [MFC06] présentent une simulation sur GPU en utilisant des colonnes d'eau sur une carte de hauteur (Figure 43, gauche). BURRELL et al. [BAB09] utilisent une simulation temps réel pour les rivières en utilisant les équations 2D et en conservant des informations 3D sur les colonnes d'eau (Figure 43, droite). [BD06] proposent une méthode pour visualiser de manière réaliste les volumes d'eau sous la forme de carte de hauteur.



Figure 43 : (Gauche) Animation de l'eau pour des terrains irréguliers sur GPU. (Droite) Simulation d'une rivière temps réel.

D'autres méthodes améliorent le réalisme en améliorant les détails de la surface. Des méthodes utilisent des ondelettes pour représenter les turbulences [Kim+08] ou des particules spécialisées pour l'écume, les vagues déferlantes, la brume [HW04 ; CM10 ; Thu+07].

Une autre possibilité est d'améliorer les particules pour contenir davantage d'informations et donc de simplifier la simulation en ajoutant de la vorticité [SRF05], des vagues [YHK07], on encore en combinant l'effet de plusieurs vagues dans des paquets de particules [JW17 ; Jes+18].

Les approches par apprentissage se développent et promettent des simulations plus rapides [Lad+15]. La simulation physique se présente alors comme un modèle par régression où l'estimation de l'accélération de chaque particule permet de modéliser l'animation. L'utilisation d'un vecteur caractéristique contraint par les équations de Navier-Stokes permet d'animer l'eau avec des pas de temps importants. Leur implémentation GPU permet d'accélérer le traitement de un à trois ordres de grandeur par rapport aux simulations traditionnelles basées sur la position. Ils obtiennent ainsi une animation temps réel avec 2 millions de particules.

L'utilisation de particules contenant de l'information permet de grandement réduire le nombre d'éléments et donc d'obtenir des résultats visuellement très convaincants en temps réel. Cependant ces méthodes sont spécifiques à un phénomène et ne peuvent pas être utilisées pour tous les types d'animation. Un autre problème important de la simulation vient

du manque de contrôle et plus particulièrement quand il s'agit de prévoir et contrôler comment les particules se comportent aux limites du lit de rivières. Il est primordial d'avoir un lit très détaillé pour obtenir une simulation réaliste. De nombreuses méthodes de simulations ne sont pas adaptées à un flux continu d'eau d'une source à un puits et ne permettent que de simuler des étendues d'eau plate comme les lacs.

2.4.2 Méthodes procédurales

Les méthodes procédurales, à l'inverse, essaient d'outrepasser ces limitations en se focalisant sur les mouvements visibles de l'eau et non sur leurs causes. Elles ont également été utilisées en complément des méthodes de simulation pour réduire leur complexité [MWM87]. Les méthodes procédurales permettent de représenter différents phénomènes et il faut donc souvent combiner différentes méthodes pour avoir une animation variée. L'animation des rivières en utilisant des méthodes procédurales n'a pas beaucoup été étudiée. L'interaction des différents phénomènes rend difficile l'animation cohérente.

En revanche, des méthodes procédurales pour animer l'eau des océans ont été développées. Ces méthodes, pour l'eau profonde, utilisent généralement des mouvements pseudo-aléatoires pour générer l'animation sur l'ensemble du domaine. Des approches dans le domaine spatial ont d'abord été étudiées en utilisant des fonctions sinusoïdales [Max81 ; FR86]. La modification des vagues en se rapprochant des côtes peut être prise en compte [Pea86 ; Li+08] puis des méthodes par divisions stochastiques [Lew87] ont été proposées. La surface de l'océan peut être décrite avec le spectre de ces oscillations [MWM87]. Ces méthodes peuvent être rendues en temps réel [Hu+06]. Des méthodes hybrides utilisant des paramètres de données réelles ont permis de créer du détail [TDG00], et permettent également un contrôle important [HNC02].

Des méthodes ont été proposées spécifiquement pour les cours d'eau. Ceux-ci ont deux régimes d'écoulement définis par le nombre de Froude : le régime fluvial et le régime torrentiel. Cette grandeur est définie par le rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse des ondes de surface. Ainsi un rapport supérieur à 1 signifie que les ondes de surface, possiblement créées par un obstacle, en un point p ne se propageront pas en amont. Plus le rapport est proche de 0, plus les ondes seront circulaires. Il est possible de caractériser la forme et le mouvement de la surface des rivières en utilisant les connaissances hydrauliques à l'échelle macroscopique. Alors que les écoulements laminaires des rivières ont été beaucoup étudiés, le régime torrentiel est plus difficile à modéliser.

Le régime fluvial se définit par son nombre de Froude inférieur à 1. Il s'agit d'un régime lent et peu turbulent. Les faibles variations de l'élévation de l'eau mènent souvent à une modélisation surfacique. Alors que certaines méthodes proposent une modélisation par textures, d'autres se sont intéressées à la modification géométrique de l'eau.

NEYRET et al. [NP01] s'intéressent à l'animation procédurale des vagues quasi-stationnaires et des ondulations dans les ruisseaux. Leur objectif est de simuler des formes et des variations de surface de l'eau pour des ruisseaux non turbulents et ce de manière efficace et à haute résolution. Ils utilisent des lois phénoménologiques beaucoup étudiées qui peuvent être utilisées dans des situations simples. En considérant un fluide 2D non compressible idéal, stationnaire et irrotationnel, les équations de Laplace permettent de définir le champ de vitesse le long du lit de rivière et autour des obstacles (Figure 44). Ce travail permet d'obtenir le champ de vitesse de l'eau et la position des vagues stationnaires.

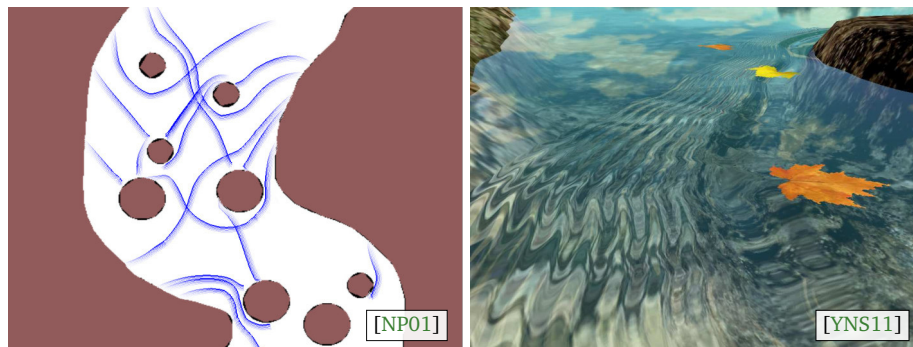


Figure 44 : (Gauche) À partir de la forme du terrain, il est possible de définir de manière efficace le positionnement des vagues. (Droite) Il est alors possible d'animer les vagues aux abords des obstacles.

CHENNEY [Che04] propose une animation des fluides laminaires à partir d'un champ de vitesse. Il crée le mouvement à l'aide de tuiles avec une texture animée. [Hoe11] reprend ce concept mais ajoute une direction principale pour chaque tuile. Cette approche est utilisée par EMILIEN et al. [Emi+15] qui utilisent une simulation 2D [Sta99] pour définir la vitesse. BRIDSON et al. [BHN07] utilisent un bruit procédural, *curl noise*, pour générer le champ de vitesse avec des conditions aux bords. Cette méthode ne permet pas de modéliser des lits de rivières complexes. Une animation interactive pour les grands mondes est alors proposée par YU et al. [Yu+09]. Une méthode pour prendre en considération l'advection a été développée [Yu+10]. Les informations du champ de vitesse local sont calculées selon les conditions au bord [PN01] puis du détail est ajouté de manière uniforme dans le domaine de l'écran en fonction du champ de vitesse. Cette méthode utilise les deux approches précédentes et permet de générer un réseau complexe avec des obstacles et des embranchements. RUI et al. [Rui+13] proposent alors une amélioration en modifiant le calcul du champ de vitesse pour le rendre plus rapide. Après avoir calculé le niveau de détail en fonction du point de vue, le champ de vitesse du flux est calculé en temps réel à partir d'un échantillonnage de Poisson. Des morceaux de textures sont alors animés pour avoir une animation de l'écoulement temps réel sur GPU. Les représentations de l'écoulement par animation de textures sont très utilisées dans les jeux-vidéos.

Par la suite, des méthodes géométriques ont été proposées pour des phénomènes particuliers. L'animation des ondulations aux abords des objets [YNS11] permet d'ajouter du réalisme. À

partir d'une surface d'eau basse résolution et d'un champ de vitesse, le maillage est subdivisé en temps réel et des vagues animées sont ajoutées automatiquement autour de l'obstacle. La représentation vectorielle des vagues permet aussi un contrôle utilisateur important. Ce modèle peut s'utiliser de manière complémentaire aux méthodes précédentes d'animation de rivières.

STOMAKHIN et al. [SS17] proposent une méthode pour intégrer une simulation locale de fluide à une représentation procédurale. La simulation physique à base de particules utilise les conditions au bord et le débit volumique pour obtenir une animation continue. Des primitives appelées *flux animated boundary (fab)* permettent de contraindre la simulation et donnent du contrôle aux artistes. Cette méthode permet ainsi un contrôle artistique, physique et s'avère être efficace. Cependant, cela ne permet pas de créer une animation temps réel.

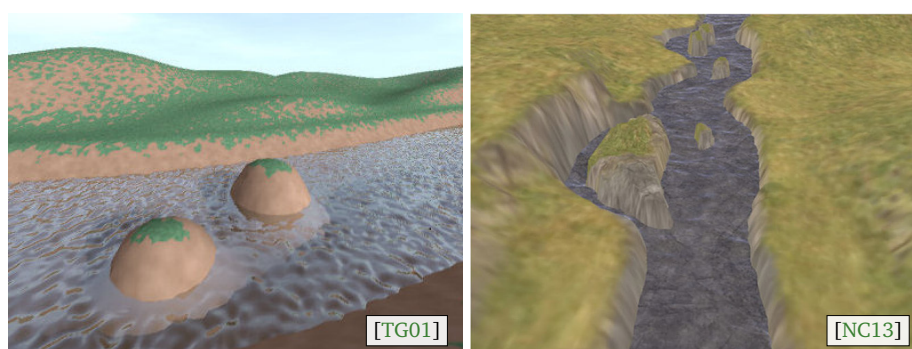


Figure 45 : Les méthodes procédurales pour générer l'animation des rivières utilisent parfois des simulations pour précalculer les caractéristiques locales pseudopériodiques de l'eau.

THON et al. [TG02] proposent une animation en temps réel pour l'écoulement de l'eau. Après avoir simulé les équations de Navier-Stokes, un nouveau champ de vitesse est créé en utilisant une transformation spectrale inverse pour chaque pas de temps. SHI et al. [Shi+07] génèrent une animation de l'eau grande échelle en utilisant un algorithme de FFT pour générer la surface de l'eau (Figure 45, gauche). NUGGAR et al. [NC13] reprennent cette idée et proposent un modèle hybride en deux temps, entre la physique et le stochastique. Le modèle utilise des éléments de surface qui bougent pour créer une animation de la surface de l'eau. Dans un premier temps, une méthode de simulation physique sur une durée donnée permet de construire un champ de vecteurs de Markov (MTVF) représentant la surface animée de l'eau. La surface de l'eau peut alors être animée en temps réel en utilisant des échantillons de surface se déplaçant aléatoirement à partir du champ de Markov (Figure 45, droite). Très peu des méthodes procédurales géométriques préservent l'advection qui permet le déplacement des vagues à la vitesse de l'eau.

Pour modéliser des cascades, il n'existe pas de méthode procédurale pour générer la géométrie 3D de l'eau. Les méthodes traditionnelles sont : soit la simulation par particules qui est très coûteuse, soit un ensemble de polygones avec des textures animées [Mal95 ; Gua+06] avec parfois quelques primitives pour donner plus de réalisme [HW04 ; Emi+15]. Cette approche minimaliste permet une utilisation sur de très grands terrains.

2.4.3 Conclusion

L'animation de l'eau est définie par le profil et la trajectoire des rivières. En théorie les simulations permettent de représenter tous les phénomènes visibles de l'eau, cependant cela suppose un lit très détaillé. De plus les méthodes de simulation ne permettent pas une simulation précise sur des dizaines de kilomètres. À l'inverse, les techniques procédurales permettent d'outrepasser ces limites et de définir l'animation par les phénomènes que l'on souhaite observer. À notre connaissance, il n'existe pas de méthodes qui garantissent une animation procédurale cohérente avec le lit de rivière.

Les méthodes de simulation permettent une animation des fluides très réaliste et elles sont souvent utilisées par l'industrie du cinéma. Cependant, comme toute méthode de simulation, il est difficile de contrôler l'apparition de caractéristiques localisées. De plus ces méthodes, compte tenu de la complexité des calculs, ne sont pas utilisables pour animer des scènes de très grande taille, ou du moins pas en temps interactif.

2.5 Synthèse

La génération de scènes naturelles est un domaine important en informatique graphique. Depuis les années 1980, de nombreuses méthodes ont été développées pour représenter et générer des terrains. Il existe cependant des problématiques d'échelles car il est difficile d'avoir du détail et un monde vaste à la fois. De plus de nombreux phénomènes modifient les terrains et il n'est pas possible de tous les simuler pour obtenir un résultat physiquement correct. Aussi, ces terrains sont souvent utilisés par des artistes et il est important que ceux-ci puissent facilement guider la création et éditer les résultats.

Plusieurs représentations pour les terrains ont été proposées en fonction des caractéristiques que l'on souhaite modéliser. Les modèles *2D* sont plus légers en mémoire et sont souvent utilisés pour les grands terrains. Cependant, ils ne peuvent pas représenter certaines caractéristiques importantes comme les falaises, les surplombs ou encore les grottes. Les modèles *3D*, d'autre part, sont coûteux en mémoire et les temps de calculs longs.

Différentes méthodes de génération ont été proposées en fonction des contraintes de l'utilisateur. Les méthodes procédurales permettent de générer le terrain rapidement sur de grands domaines et s'appuient sur des caractéristiques spécifiques. De nombreuses contraintes se sont rajoutées au fur et à mesure afin d'apporter davantage de réalisme aux terrains. Les méthodes par l'exemple utilisent des données réelles pour générer de nouveaux terrains mais ne permettent pas de garantir un écoulement réaliste. Les techniques de simulation permettent de modifier un terrain pour ajouter de la cohérence à celui-ci en appliquant des phénomènes physiques. Ces méthodes sont souvent utilisées sur des terrains procéduraux pour les améliorer.

Les temps de calculs sont longs bien que de nombreux travaux aient grandement contribué à réduire ce temps.

Le calcul du réseau hydraulique sur un terrain permet de juger de sa cohérence et plusieurs travaux ont contraint leur création avec l'utilisation d'un réseau réaliste. Ces méthodes ont permis de générer des terrains convaincants, cependant elles ne permettent pas de créer le lit des rivières de manière suffisamment détaillée pour l'utiliser afin d'animer l'eau le parcourant. Certaines techniques se sont intéressées à l'amplification d'un terrain par ajout d'un lit de rivière. Cependant aucune ne permet de créer de manière concomitante le lit de rivière et l'animation de l'eau associée.

Les techniques pour animer l'eau se divisent entre les simulations qui appliquent la physique des fluides et les techniques procédurales qui animent l'eau en cherchant à recréer les phénomènes sans simuler les causes. Les méthodes de simulations ont été beaucoup étudiées et permettent d'obtenir des résultats de très bonne qualité sur de petits domaines. Cependant l'utilisation sur une rivière est complexe. D'une part car les détails de l'eau que l'on souhaite observer sont de l'ordre du centimètre et que les rivières mesurent souvent des kilomètres, d'autre part car les méthodes de simulation nécessitent des lits de rivières très détaillés afin de pouvoir former des caractéristiques intéressantes. Ce domaine est très actif.

Les méthodes d'animation procédurales permettent d'animer de l'eau sur de grands domaines, cependant ces techniques ne permettent de représenter qu'un nombre restreint de caractéristiques. Afin de modéliser des comportements réalistes ces méthodes ont parfois recours à des simulations pour extraire certains paramètres de l'animation.

Des méthodes pour générer des scènes avec des réseaux de rivières ont été développées, cependant elles ont isolé les problématiques et il n'existe pas de méthode permettant de modéliser un terrain avec un graphe de rivières cohérent permettant d'animer l'eau sur son ensemble.

MODÈLE DE RIVIÈRE



Table des matières

3.1	Modélisation d'un terrain par arbre de construction	52
3.1.1	Primitives de terrain	53
3.1.2	Opérateur de combinaison	59
3.1.3	Comparaison avec l'existant	62
3.1.4	Résultats	63
3.2	Modélisation des rivières par arbre d'écoulement	63
3.2.1	Arbre d'écoulement	64
3.2.2	Primitives d'écoulement	65
3.2.3	Opérateurs animés de combinaison	68
3.2.4	Résultats	69
3.3	Conclusion	72

Les réseaux hydrauliques permettent de structurer les terrains. La cohérence du réseau apporte du réalisme et l'animation de la surface de l'eau apporte du dynamisme à la scène. Les méthodes de création de scènes de rivières proposées actuellement ne permettent pas d'animer une rivière cohérente sur un grand domaine. Nous proposons dans ce chapitre un modèle unifié pour décrire la géométrie de la rivière et l'animation de l'eau qui lui est associée. Ce modèle utilise la représentation par arbre de construction de terrain [Gén+15] et l'améliore afin de proposer un modèle d'animation d'eau intégré au modèle. À l'image des arbres de constructions de terrain qui utilisent des modelés à support compact pour représenter les caractéristiques spécifiques des terrains, les arbres d'animation d'eau, aussi appelés arbres d'écoulement, contiennent des primitives représentatives des phénomènes observables. Ce modèle permet de représenter des terrains de grandes tailles avec une rivière animée. Ce modèle est particulièrement adapté à la création par un artiste car les primitives permettent un contrôle de la modélisation par le résultat. Après avoir rappelé le modèle d'arbre de construction pour le terrain (section 3.1), nous détaillerons notre modèle d'arbre d'écoulement qui permet l'animation d'un large réseau de rivières en temps réel (section 3.2).

3.1 Modélisation d'un terrain par arbre de construction

Les arbres de construction de terrain s'inspirent de la géométrie de construction des solides (*Constructive Solid Geometry, CSG*) et des surfaces implicites. Notre modèle combine des éléments atomiques, formés à partir de leur squelette pour représenter des objets complexes. Ainsi notre modèle permet de définir un terrain d'élévation qui peut aussi être multi-matériaux. Cette section rappelle les principaux éléments nécessaires à notre modèle mais une lecture approfondie de la méthode originale et du manuscrit de thèse de GÉNEVAUX [Gén+15 ; Gén15] est fortement recommandée. Ce modèle utilise des primitives décrivant localement le relief qui sont stockées et assemblées dans un arbre de construction. Il permet de ne pas stocker l'ensemble de l'information sous la forme de données, diminuant ainsi le coût mémoire et facilite l'édition de la scène grâce à ses primitives locales. De plus, la structure de stockage permet une évaluation rapide de l'arbre et une faible empreinte mémoire.

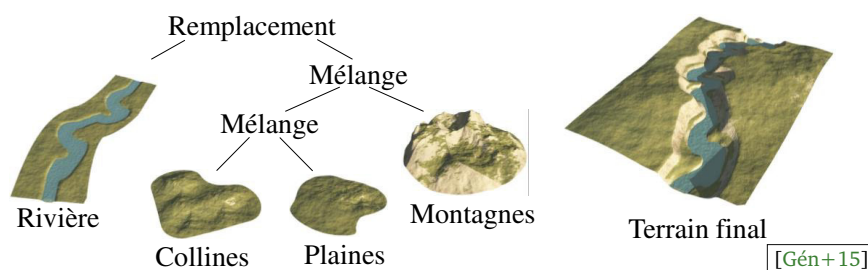


Figure 46 : Différentes primitives de caractéristiques sont combinées dans un arbre de construction pour représenter un terrain avec un lit de rivière. Le modèle permet une édition intuitive et la représentation est compacte en mémoire.

Les arbres se composent de feuilles représentant des modelés, aussi appelés primitives, qui représentent une caractéristique de terrain spécifique. Les nœuds internes de l'arbre représentent les opérateurs permettant de combiner les différentes primitives afin d'évaluer la hauteur finale du terrain en tout point. La structure hiérarchique de l'arbre permet d'évaluer rapidement l'arbre en un point donné.

Chaque nœud de l'arbre de construction définit deux fonctions :

- La fonction d'élévation $f_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ permet d'évaluer la hauteur du terrain en tout point.
- La fonction de poids $\alpha_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^+$ permet de combiner les primitives en fonction des opérateurs mis en jeu.

La fonction de poids permet de définir le domaine Ω_i du modelé :

$$\Omega_i = \{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2 \mid \alpha_i(\mathbf{p}) > 0\}.$$

Les primitives étant sur un support compact, chaque sous-arbre représente un morceau de terrain qui pourra être combiné avec d'autres primitives. On définit le terrain d'élévation \mathcal{T} tel que pour tout point \mathbf{p} du domaine $\Omega_{\mathcal{T}}$ considéré, on évalue la fonction f de l'arbre en \mathbf{p} . On a alors :

$$\mathcal{T} = \{(\mathbf{p}, f(\mathbf{p})) \in \mathbb{R}^3, \mathbf{p} \in \Omega_{\mathcal{T}}\}.$$

Afin de définir le terrain en tout point, il faut que des primitives recouvrent l'ensemble du terrain considéré, soit $\Omega_{\mathcal{T}} \subset \bigcup_i \Omega_i$. Cette représentation permet d'évaluer les élévations uniquement aux endroits nécessaires et d'adapter la résolution en fonction du niveau de détail souhaité. Les nœuds étant définis sur des supports compacts, une structure par boîtes englobantes en découle par nature et permet d'évaluer chaque point du terrain efficacement. Ce modèle a été utilisé afin de compresser des terrains en utilisant des techniques de compression parcimonieuse mais aussi pour augmenter les détails du terrain.

Dans cette partie, nous présentons le modèle de construction tel que décrit dans [Gén+15 ; Gén15]. Nos principales contributions concernent la représentation de modelés spécifiques : plutôt que de représenter les rivières par peu de primitives complexes (courbes couplées à des fonctions d'élévation), nous proposons une construction par assemblage d'un grand nombre de primitives simples. À ce titre, nous effectuons une comparaison sur l'utilisation d'une primitive complexe et l'assemblage de primitives simples. Les détails sur la distribution automatique des primitives seront abordés dans le [chapitre 4](#).

3.1.1 Primitives de terrain

Différentes primitives ont été proposées [Gén+15]. Les primitives définissent donc une fonction d'élévation et une fonction de poids. La représentation et la génération de ces

fonctions peuvent varier en fonction des besoins. Pour les fonctions d'élévations, les méthodes présentées [chapitre 2](#), telles que les bruits procéduraux, peuvent être utilisées.

3.1.1.1 Génération et représentation des élévations

Les élévations des primitives sont principalement définies par des fonctions globales de type bruit qui permettent d'obtenir une forme continue infinie pour un faible coût mémoire. Traditionnellement, on utilise des sommes de bruit sur plusieurs octaves comme présenté dans [\[MKM89\]](#) et expliqué dans la [partie 2.2.3.1](#) de l'état de l'art. On définit alors l'élévation $f(\mathbf{p})$ comme :

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^o a_i n(\mathbf{p}/l_i)$$

où a_i représente l'amplitude de la $i^{\text{ème}}$ octave et l_i sa longueur d'onde. D'autres combinaisons plus complexes que la somme sont possibles pour créer des multi-fractales [\[MKM89 ; Ebe+02\]](#). Les inconvénients principaux de cette représentation, le manque de contrôle et le manque de variété, ne sont pas limitants pour l'utilisation dans une primitive car les modèles sont définis dans un domaine limité et restent ainsi très localisés sur le terrain et que l'arbre de construction permet de composer différentes primitives afin de diversifier le contenu et donc d'obtenir le résultat souhaité. Les fonctions globales sont recommandées car elles permettent de créer un contenu différent en modifiant de simples paramètres, de plus, leur empreinte mémoire est très faible. Il faut cependant garder en tête que leur évaluation doit être efficace.

Dans certains cas, des primitives issues de données réelles ou faites par un artiste peuvent être utilisées. Ces primitives permettent d'apporter des caractéristiques complexes et donc du réalisme dans la scène. Ces données sont généralement stockées sous la forme de carte d'élévation.

3.1.1.2 Génération des fonctions de poids

Les fonctions de poids $\alpha(\mathbf{p})$ permettent d'assembler différentes primitives pour former un terrain réaliste. Pour garantir des transitions douces, des fonctions g décroissantes C^1 sont définies en fonction de la distance $d(\mathbf{p})$ par rapport au squelette ou du bord de la primitive.

$$\alpha(\mathbf{p}) = g \circ d(\mathbf{p}).$$

Le choix de cette fonction influence le temps de rendu mais aussi la qualité de la combinaison des primitives. Nous utilisons dans notre implémentation la fonction g_n définie par WYVILL et al. [\[WGG99\]](#) qui permet d'une part une classe de C^n avec $n \geq 0$ et d'autre part du contrôle ([Figure 47](#)).

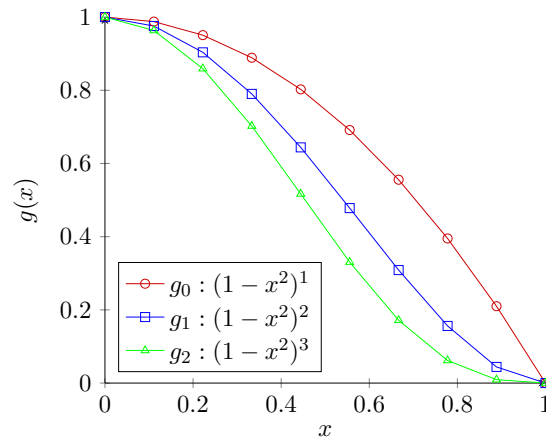


Figure 47 : La fonction de lissage telle que décrite pour les surfaces implicites par WYVILL et al. [WGG99] permet des transitions douces entre les primitives.

Pour un lissage sur une distance r , on a :

$$g_n(x) = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2\right)^{n+1} & \text{si } x < r, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

De manière générale, différents types de fonctions de lissage existent et ont été proposés en modélisation de surfaces implicites, les caractéristiques essentielles sont le degré de continuité et à ce titre la cubique de classe C^2 est la plus fréquemment utilisée.

3.1.1.3 Primitives ponctuelles

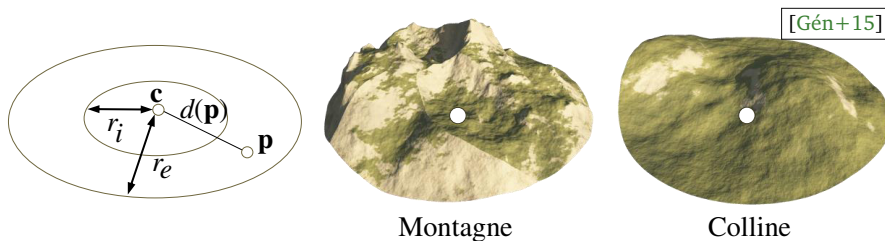


Figure 48 : Les primitives ponctuelles permettent de représenter un morceau de terrain sur un domaine circulaire. La distance au centre permet de définir la fonction de poids de sorte à définir la zone d'influence r_i et la zone de lissage r_e . Le type de la primitive permet de définir la fonction d'élévation et en général, une fonction de bruit est utilisée.

Les primitives ponctuelles représentent des disques de terrain. Elles se caractérisent par un centre $\mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$, un rayon d'influence intérieur r_i et un rayon extérieur r_e . Les coordonnées c_{xy} permettent de localiser la primitive spatialement et la coordonnée c_z de la positionner en hauteur. Le rayon intérieur r_i permet de décrire la zone d'influence de la primitive où le poids est constant et le rayon extérieur r_e décrit les limites d'influence de la

primitive. La fonction de lissage s'appliquant alors entre r_i et r_e (Figure 48). En appelant η la fonction de relief, nous obtenons les fonctions suivantes :

$$f(\mathbf{p}) = c_z + \eta(\mathbf{p} - \mathbf{c}_{xy}) \quad \alpha(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(\mathbf{p}) < r_i, \\ \left(1 - \left(\frac{d(\mathbf{p}) - r_i}{r_e - r_i}\right)^2\right)^3 & \text{si } r_i \leq d(\mathbf{p}) < r_e, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

La primitive est donc la combinaison d'une fonction destinée à rendre son support compact et d'une fonction d'élévation. Cette stratégie se retrouve dans toutes les autres primitives développées.

3.1.1.4 Primitives courbes

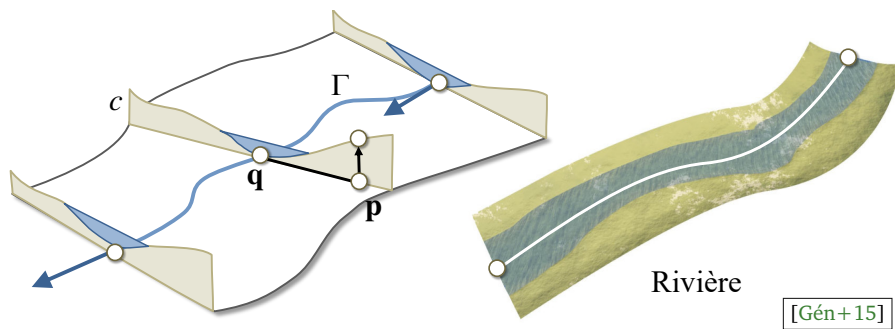


Figure 49 : Les primitives courbes sont développées pour créer un relief le long d'une trajectoire. La distance à la courbe permet d'évaluer l'élévation selon plusieurs profils. Le choix des courbes et des profils doit permettre un calcul rapide. Un modèle pour les rivières et un pour les routes ont été proposés. Les règles de construction des chaussées garantissent une construction cohérente du réseau routier.

Les primitives courbes sont construites à partir d'une courbe Γ et construisent le terrain en fonction de la distance à celle-ci (Figure 49).

Le choix du type de courbe est important car il influe sur la qualité du résultat mais également sur le temps d'évaluation de la primitive. Pour les courbes polynômiales, le degré de la courbe doit permettre une évaluation analytique de la distance à la courbe mais également garantir la continuité. Les courbes quadratiques répondent à ces deux exigences en garantissant une continuité C^1 . Il est possible d'utiliser différents types de courbe en fonction de l'usage.

Par la suite, un ensemble de profils $\{c_i = (f_i, \alpha_i)\}$ définit les coupes transversales pour les hauteurs f_i et le poids de la primitive α_i en fonction de l'abscisse curviligne. La distance signée à la courbe et l'abscisse curviligne du projeté correspondant permettent d'évaluer l'élévation et le poids du point en interpolant entre les profils. À la manière du choix de la courbe, le choix de l'interpolation joue un rôle important : plus le degré de l'interpolation est élevé, plus il faut

évaluer de hauteurs. L'interpolation bicubique est un bon compromis entre performance et résultat.

En supposant une interpolation linéaire entre les profils et en notant \mathbf{q} le projeté de \mathbf{p} sur Γ , c_i et c_{i+1} les profils entourant \mathbf{q} avec un ratio β sur la distance curviligne, alors les fonctions d'élévation $f(\mathbf{p})$ et de poids $\alpha(\mathbf{p})$ s'écrivent :

$$f(\mathbf{p}) = \mathbf{q}_z + (1 - \beta)(f_i \circ d(\mathbf{p})) + \beta(f_{i+1} \circ d(\mathbf{p}))$$

$$\alpha(\mathbf{p}) = (1 - \beta)(\alpha_i \circ d(\mathbf{p})) + \beta(\alpha_{i+1} \circ d(\mathbf{p}))$$

Les profils de rivières dépendent de la classification de Rosgen, présentée sous-section 4.1.5. Elle permet de créer des profils asymétriques dépendant de la pente, de la situation géographique et de la trajectoire de la rivière. Les profils incluent le lit majeur de la rivière, habituellement rempli d'eau, les berges et lit mineur aussi appelé zone inondable (Figure 50). L'eau est directement incluse dans le profil.

L'utilisation pour les zones de confluence est cependant problématique et l'utilisation de primitives images est recommandée (voir partie 3.1.1.6). Nous ne conseillons pas l'utilisation de primitives complexes de ce type afin de générer des lits de rivières. En effet, de nombreux types de rivière existent dont certains avec des courbures importantes et ces courbures ne permettent pas de garantir des profils cohérents. De plus la méthode proposée lisse les bords des rivières. Notre approche propose de subdiviser la rivière en un ensemble de primitives ponctuelles qui permettent un contrôle plus fin. Nous proposons pour répondre à cette problématique une méthode de placement procédurale section 4.2.

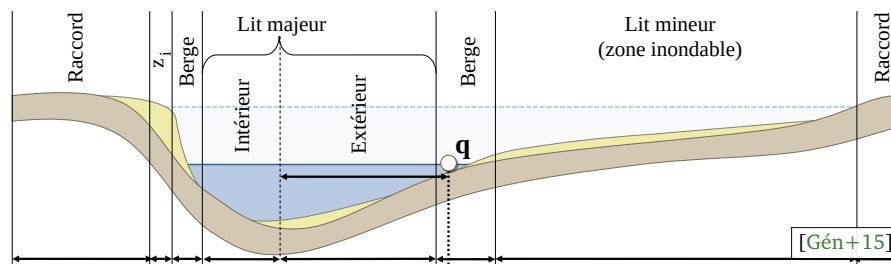


Figure 50 : Les profils des rivières ont été étudiés et ces connaissances permettent de créer des profils réalistes. L'utilisation le long d'une courbe, même en interpolant les différents profils, lisse les berges et ne permet pas la création d'un lit détaillé. Notre approche préconise de diviser les primitives complexes en combinant de nombreuses primitives simples.

3.1.1.5 Primitives à contours

Des primitives pour créer des formes complexes ont été proposées. Ces primitives se composent d'un centre c associé à une fonction de distance relative à l'orientation pour définir les bords de la primitive (Figure 51). Différents profils de coupe c sont créés en

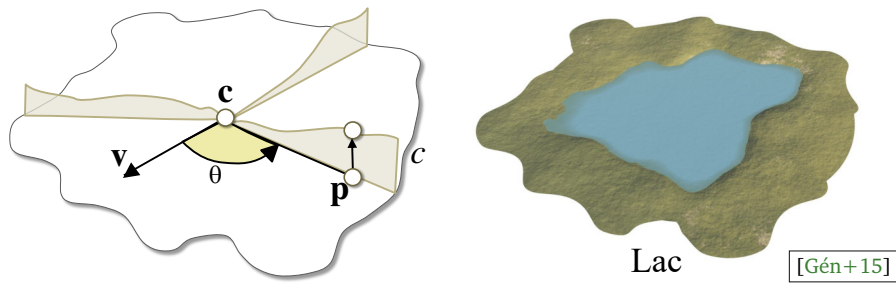


Figure 51 : Les formes à contours permettent de définir des formes dont la distance du contour au centre varie suivant l'orientation. L'utilisateur spécifie une fonction de distance ainsi que différents profils. Ces primitives permettent par exemple de définir des lacs.

fonction de l'orientation. Pour calculer l'élévation et le poids d'un point \mathbf{p} , les coordonnées de ce point sont converties en coordonnées polaires $(\theta(\mathbf{p}), r(\mathbf{p}))$ par rapport au centre \mathbf{c} . À partir de l'angle $\theta(\mathbf{p})$ obtenu, on définit les coupes c_i et c_{i+1} à utiliser. Le rayon $r(\mathbf{p})$ permet, une fois normalisé, de calculer l'élévation et le poids issus des profils. À l'image des primitives courbes, la hauteur et le poids sont interpolés entre les différents profils.

$$f(\mathbf{p}) = \mathbf{c}_z + c \circ r(\mathbf{p}) \qquad \alpha(\mathbf{p}) = c_\alpha \circ r(\mathbf{p})$$

3.1.1.6 Primitives quadrangulaires

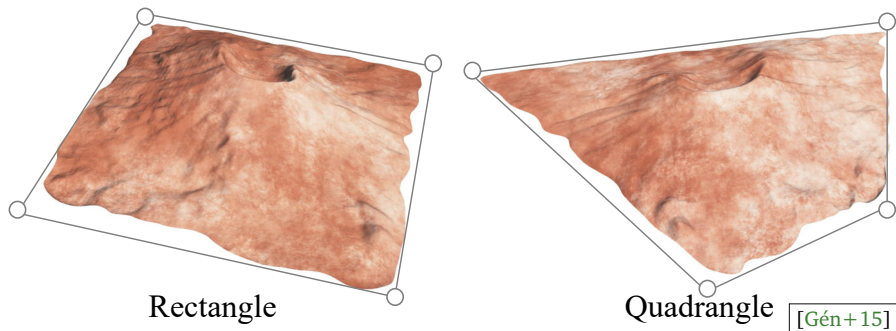


Figure 52 : L'utilisation de données réelles comme ici avec le *Mont St. Helens*, U.S.A. permet d'apporter du réalisme à la scène. Les élévations sont interpolées à partir de la paramétrisation de la carte d'élévations.

Des primitives à base de quadrangles permettent de construire des reliefs à partir de cartes d'élévations. L'utilisateur définit quatre points pour former un quadrangle. La paramétrisation $m(\mathbf{p}) = (u, v)$ sur une 2-variété permet de faire correspondre le raster au quadrangle. L'évaluation de la hauteur $h(u, v)$ sur le MNT et la projection \mathbf{q} de \mathbf{p} sur le quadrangle permet d'obtenir la hauteur de la primitive. La distance d au bord, à l'intérieur du quadrangle, permet de définir la fonction de poids. On a alors :

$$f(\mathbf{p}) = q_z + h \circ m(\mathbf{p}) \qquad \alpha(\mathbf{p}) = g_2 \circ d(\mathbf{p})$$

Ces primitives permettent d'apporter du réalisme à la scène en ajoutant des données réelles (Figure 52). L'évaluation de la primitive est très rapide cependant le coût mémoire est important.

3.1.2 Opérateur de combinaison

Les primitives représentent des caractéristiques *pures* des terrains. Cependant, dans la nature, un ensemble important de phénomènes crée les terrains et la combinaison de ceux-ci forment les contenus réalistes et variés. La structure d'arbre de construction permet de combiner les primitives grâce à des opérateurs. Différentes fonctions de combinaisons sont proposées en fonction des relations entre les éléments. Les opérateurs, qui sont les nœuds internes de l'arbre, prennent comme paramètres une ou plusieurs primitives.

3.1.2.1 Opérateur de mélange

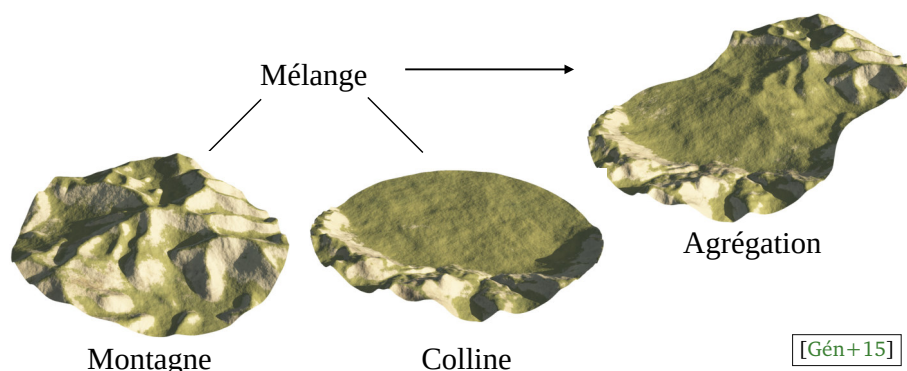


Figure 53 : L'opérateur de mélange est utilisé pour combiner différentes primitives et permet de créer des transitions lisses entre les différents milieux.

Les opérateurs de mélange permettent de combiner deux primitives A et B et de créer des transitions entre deux milieux différents (Figure 53). Les élévations sont pondérées selon le poids des primitives au point considéré. Le poids résultant est la somme du poids des primitives. L'élévation f en \mathbf{p} dépend donc de l'élévation f_A et f_B des primitives et de leur fonction de poids α_A et α_B tel que :

$$f = \frac{\alpha_A f_A + \alpha_B f_B}{\alpha_A + \alpha_B} \quad \alpha = \alpha_A + \alpha_B.$$

Cet opérateur peut s'étendre à n primitives, de plus il est commutatif et associatif. Ces propriétés permettent d'optimiser la profondeur de l'arbre. Si de nombreuses primitives se combinent sur un domaine important, une structure par grille accélératrice peut être utilisée.

Cet opérateur peut cependant créer des artefacts. Le relief est alors lissé et la dynamique diminue. En effet, cet opérateur ne permet pas de préserver la variance de chaque primitive. Si les hauteurs des primitives forment une distribution gaussienne, l'opérateur de mélange qui préserve la covariance pourrait être envisagé [HN18].

3.1.2.2 Opérateur de remplacement

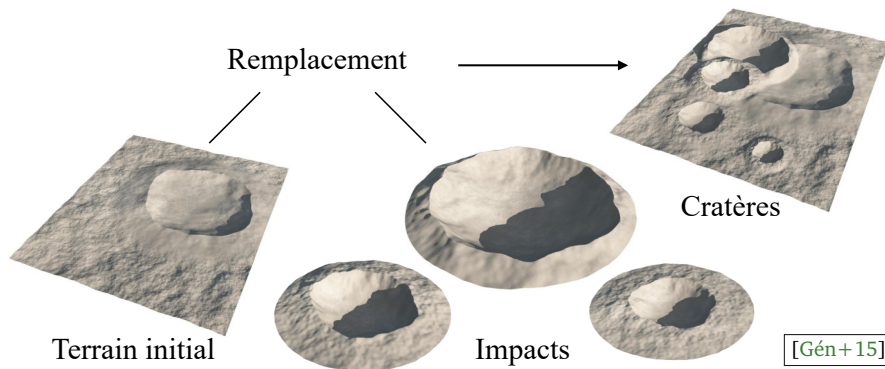


Figure 54 : L'opérateur permet de garantir la géométrie du terrain sur un certain domaine. Il est utilisé pour le placement de lac mais aussi pour placer un événement survenu après la formation du terrain. C'est le cas ici avec la formation de cratères.

L'opérateur de remplacement permet de modifier le terrain avec une caractéristique qui écrasera ce qui avait été construit. Il est utilisé essentiellement pour ajouter une caractéristique arrivant temporellement après un autre. C'est notamment le cas d'une route ou d'un impact (Figure 54). Mais il est aussi utilisé pour garantir un relief précis comme un lit de rivière ou un lac. La jonction avec le reste du terrain est lisse.

Dans le cas d'un terrain A où l'on souhaite ajouter (par remplacement) une caractéristique d'un terrain B , on a :

$$f = (1 - \alpha_B) f_A + \alpha_B f_b, \quad \alpha = \alpha_A.$$

3.1.2.3 Opérateur d'ajout

Cet opérateur permet de déposer de la matière progressivement sur un terrain ou d'ajouter du détail. Dans le cas d'un terrain A où l'on souhaite ajouter de la matière d'un terrain B , on définit l'opérateur par :

$$f = f_A + \alpha_B f_B, \quad \alpha = \alpha_A.$$

Cet opérateur peut facilement être modifié pour contraindre l'ajout à certaines zones du terrain, comme sur la Figure 55 où le dépôt est contraint par la pente et par l'élévation.

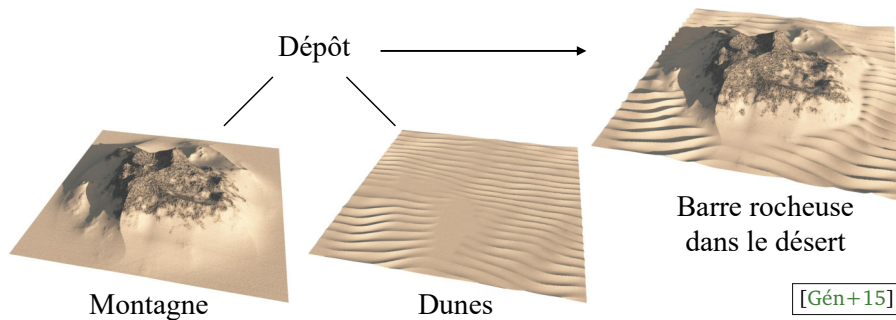


Figure 55 : L'opérateur d'ajout permet d'empiler de la matière à un terrain. On ajoute ici du sable à une barre rocheuse pour créer un paysage désertique. Afin que l'ajout soit réaliste, des contraintes sur la pente et l'élévation ont été ajoutées.

3.1.2.4 Opérateur de déformation

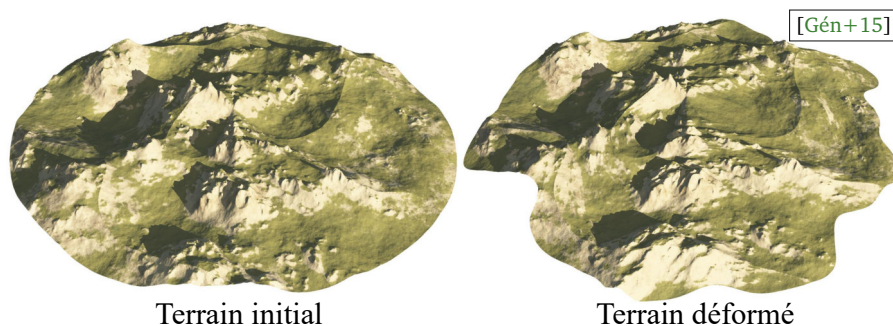


Figure 56 : L'opérateur de déformation permet de créer de la variété dans les primitives.

L'opérateur de déformation permet de modifier une primitive existante (Figure 56). Cet opérateur unaire déforme une primitive A suivant une fonction C^2 bijective notée $\omega(\mathbf{p}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$. On l'évalue avec :

$$f(\mathbf{p}) = f_A \circ \omega^{-1}(\mathbf{p}), \quad \alpha(\mathbf{p}) = \alpha_A \circ \omega^{-1}(\mathbf{p}).$$

Le calcul du gradient d'une primitive après déformation se définit par :

$$\nabla f(\mathbf{p}) = \nabla f_A \circ \omega^{-1}(\mathbf{p}) \times J_{\omega^{-1}}(\mathbf{p}).$$

Le terme $\nabla f \circ \omega^{-1}$ est facile à calculer puisqu'il s'agit du gradient du sous arbre calculé pour le point déformé. En revanche, le calcul du Jacobien $J_{\omega^{-1}}$ peut être complexe dans le cas général. Pour les déformations de Barr [Bar84], il existe une formulation analytique simple de ω^{-1} et donc $J_{\omega^{-1}}$ peut être calculé explicitement. Pour des déformations plus complexes, on approxime numériquement $\nabla f(\mathbf{p})$, ce qui nécessite cependant 4 évaluations de f autour de p .

3.1.2.5 Opérateur de remplissage



Figure 57 : Pour mettre de la matière jusqu'à une certaine hauteur, l'opérateur de remplissage ajoute la différence entre la hauteur souhaitée et la hauteur actuelle. Il est adapté pour ajouter une surface plane d'eau mais ne permet pas de créer un écoulement réaliste animé.

Ce dernier opérateur permet de remplir le terrain A jusqu'à une certaine élévation donnée par la primitive B . Il a été conçu pour ajouter de l'eau sur un terrain, même si celui-ci est en pente (Figure 57).

Il se définit par :

$$f(\mathbf{p}) = \begin{cases} 0 & \text{si } f_A \geq f_B, \\ (f_A - f_B) \times \max(1, \alpha_B) & \text{sinon,} \end{cases} \quad \alpha(\mathbf{p}) = \alpha_B(\mathbf{p}).$$

Cet opérateur s'utilise en général en dernier et le poids n'est plus utilisé après son utilisation. L'utilisation de cet opérateur ne permet pas d'animer l'écoulement ni de créer du détail sur la surface de l'eau. Nous proposons d'utiliser un arbre d'écoulement en plus de l'arbre de construction de terrain (section 3.2).

3.1.3 Comparaison avec l'existant

L'utilisation d'une primitive complexe pour former le terrain ne permet pas de représenter la complexité des rivières. La structure complexe du bord des rivières est lissée lorsque l'on interpole les hauteurs des différents profils (Figure 58). De plus, le raccord entre les primitives est difficile. D'une part, il est nécessaire de définir l'enchaînement possible des primitives, d'autre part le positionnement doit assurer la continuité entre celles-ci. Les primitives ne permettent pas de créer des jonctions et il est nécessaire d'effectuer ce travail à la main. Les primitives images bien que permettant de créer du détail ont une empreinte mémoire importante et ne sont pas facilement réutilisables. De plus, les courbes et les images créent

des répétitions et ne permettent pas de générer de la variété. L'utilisation de nombreuses primitives permet de créer du détail et leur paramétrisation génère de la variété. Bien que l'arbre soit plus profond, l'évaluation des primitives est plus rapide et l'évaluation finale de la hauteur est rapide. L'utilisation de plusieurs primitives permet aussi de contrôler plus facilement la création. Le placement des nombreuses primitives pour former le lit de la rivière peut demander plus de travail à l'artiste, aussi nous proposons un algorithme de placement automatique [chapitre 4](#).

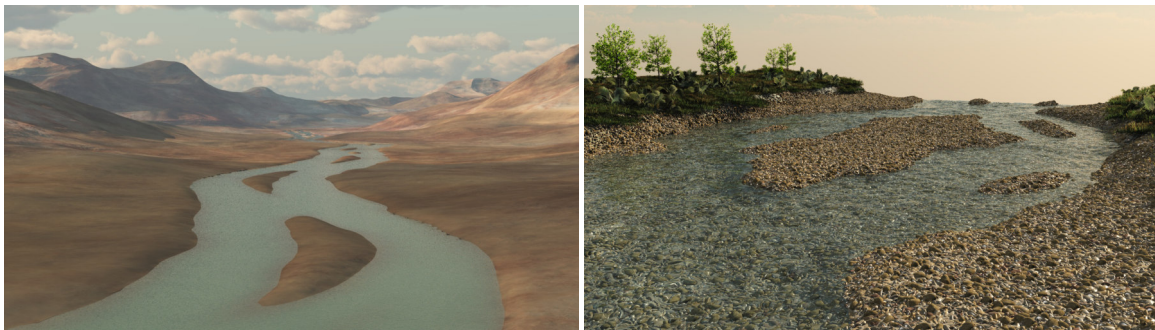


Figure 58 : L'utilisation d'une primitive complexe (gauche) pour représenter la géométrie de la rivière ne permet pas de créer du détail et la combinaison de primitives simples (droite) est privilégiée.

3.1.4 Résultats

Le modèle d'arbre de construction hiérarchique permet de créer un terrain détaillé en combinant des primitives spécifiques à chaque caractéristique. La construction utilisant un arbre et divers opérateurs de combinaison s'inspire des surfaces implicites et en particulier du Blob Tree [WGG99]. La représentation permet de générer un grand niveau de détail avec une empreinte mémoire faible. Le réalisme de la scène provient de l'ajustement des paramètres de placement et du choix des fonctions de combinaison. Le modèle a d'ailleurs été utilisé pour différents algorithmes de génération [Gén+13 ; Gu16]. Cependant la structure propose un contrôle utilisateur important et l'édition est intuitive.

3.2 Modélisation des rivières par arbre d'écoulement

Notre approche pour représenter et animer l'écoulement des rivières s'inspire de l'arbre de construction de terrain précédent. Il permet de généraliser l'arbre de caractéristiques hiérarchiques développé par GÉNEVAUX et al. [Gén+15] pour un contenu animé. Pour cela, nous définissons non pas une fonction d'évaluation statique $f(\mathbf{p})$ mais une fonction évoluant au cours du temps $f(\mathbf{p}, t)$. Notre hypothèse est que l'écoulement de l'eau d'une rivière peut être approximé en régime permanent par une animation quasi-périodique. De ce fait,

nous décrivons la hauteur de l'eau par des combinaisons de primitives, elles-même quasi-périodiques, qui formeront l'animation.

3.2.1 Arbre d'écoulement

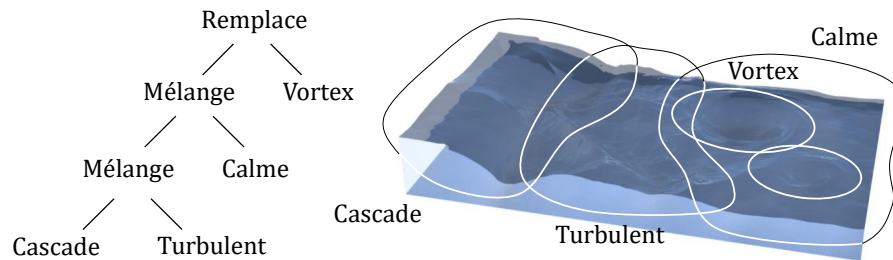


Figure 59 : Un exemple de primitives animées d'écoulement de rivière organisées dans un arbre de construction hiérarchique : le corps de la rivière est créé en combinant une cascade avec plusieurs primitives de turbulence et d'eau calme d'amplitude décroissante, avant d'ajouter des tourbillons avec différents radii, en remplaçant localement les surfaces générées par des primitives de vortex (par souci de concision, les primitives de cascades, turbulences et vortex représentent des sous-arbres).

Notre modèle, l'*arbre de construction d'écoulement* hiérarchique (illustré **Figure 59**) regroupe des primitives procédurales d'eau animée et différents opérateurs de combinaison. Les primitives d'écoulement regroupent les schémas temporels auto-similaires observés couramment dans les rivières. Chaque primitive est responsable de l'animation d'une structure cohésive de la surface de l'eau, telle que les vagues, les tourbillons ou encore les sillages. Chaque primitive est localisée et porte sur un support compact Ω . Les primitives sont paramétrées afin de permettre un contrôle utilisateur intuitif et de s'adapter au contexte. Leur empreinte mémoire est faible et elles permettent de générer un contenu animé précis et varié. Les opérateurs de combinaison sont les nœuds internes de l'arbre et permettent d'agréger les primitives et les sous-arbres.

Pour chaque nœud interne et chaque feuille de l'arbre, on définit quatre fonctions de sortie permettant l'animation de la surface de l'eau : l'élévation de l'eau $w(\mathbf{p}, t)$, la vitesse en surface $\mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$, l'effervescence $s(\mathbf{p}, t)$, qui différencie l'eau claire de l'écume et qui qualifie la texture utilisée, et enfin la fonction de poids $\alpha(\mathbf{p})$ qui permet de combiner les sous-arbres. Ces fonctions dépendent de la position $\mathbf{p} \in \Omega$ mais aussi du temps t parce que l'eau est animée. Une exception est faite pour la fonction de poids $\alpha(\mathbf{p})$ qui ne dépend que de la position spatiale. Ainsi la position des primitives est fixe et seule la fonction d'élévation dépendante du temps permet le mouvement de la géométrie de la surface de l'eau.

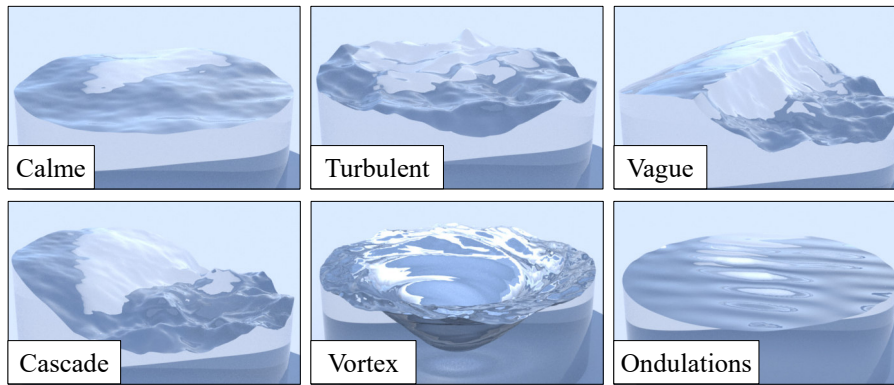


Figure 60 : Des primitives d'eau en mouvement sont implémentées dans notre modèle, et animées en fonction de la hauteur d'eau w , de l'amplitude a et de la vitesse u .

3.2.2 Primitives d'écoulement

Nous avons implémenté différentes primitives procédurales avec des caractéristiques dynamiques spécifiques (Figure 60). On nomme ces primitives : calme, turbulente, vague, cascade, vortex et ondulations. D'autres primitives ont été créées pour ajouter des effets spécifiques tels que l'écho des ondulations qui approxime les mouvements complexes entre l'eau et les berges. Nous appelons ici cascade, les sursauts d'eau. Il est facile de développer de nouvelles primitives d'écoulement par nature et de les inclure dans l'arbre de construction animé.

Les primitives d'écoulement se basent sur les primitives ponctuelles telles que décrit en [partie 3.1.1.3](#). De manière similaire à la [partie 3.1.1.2](#), le poids des primitives α se présente sous la forme d'une fonction radiale C^1 qui décroît progressivement sur un support de disque compact de rayon R , noté $\Omega = \mathcal{B}(\mathbf{c}, R)$. Cela permet de limiter l'influence des primitives et de contrôler leurs interactions.

La fonction de poids α est semblable à celle utilisée pour les terrains ([section 3.1](#)). Il s'agit d'une composition entre la distance au centre du disque $d(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{c}\|/R$ et une fonction d'atténuation g lisse C^2 . On choisit la fonction de WYVILL et al. [WGG99] :

$$g(r) = \begin{cases} (1 - r^2)^3 & \text{si } r < 1, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

et on a alors :

$$\alpha = g \circ d(\mathbf{p}).$$

Toutes les primitives sont caractérisées par des paramètres d'entrée qui contrôlent les fonctions de sorties w , u et s . Il s'agit de l'élévation moyenne e , l'amplitude a et la vitesse moyenne u .

3.2.2.1 Primitives calme, ondulation et turbulence

Les primitives d'eau calme sont générées pour les régions avec peu de mouvement. Elles ne produisent que des mouvements d'eau de faible fréquence et des ondulations faibles. À l'inverse, les primitives d'eau turbulente sont créées pour les zones agitées avec des vitesses importantes. Enfin, les ondulations représentent les perturbations hautes fréquences de la surface de l'eau, causées par les vents contraires.

Ces trois primitives sont décrites de manière similaire mais avec des paramètres différents. Elles sont la somme de l'élévation de base e et d'une fonction $\delta h(\mathbf{p}, t)$ dépendantes d'un coefficient d'amplification a défini par l'utilisateur et qui permet de contrôler l'amplitude des mouvements. La hauteur de l'eau est définie par :

$$w(\mathbf{p}, t) = e + a \delta h(\mathbf{p}, t).$$

La fonction δh est définie à partir d'une somme de n fonctions de bruits aussi appelée mouvement Brownien fractionnaire m . Elle se paramètre avec la persistance p , la lacunarité l et la fréquence f . On a :

$$\delta h(\mathbf{p}, t) = m \circ \omega^{-1}(\mathbf{p}, t).$$

La fonction $\omega^{-1} : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ représente la déformation en temps qui permet le mouvement de l'eau. Dans le cas d'un simple mouvement uniforme avec une vitesse \mathbf{u} , on définit : $\omega^{-1}(\mathbf{p}, t) = \mathbf{p} - t\mathbf{u}$.

Les primitives calmes et d'ondulation utilisent des bruits de gradient m_g tandis que les primitives d'eau turbulente utilisent des bruits de crêtes m_c pour produire des brisures nettes. Soit $\mathbf{n}(\mathbf{p}) : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}$, un bruit a une harmonique, on a :

$$m_g(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^{n-1} \alpha p^i \mathbf{n}(f \cdot l^i \mathbf{p}) \quad m_c(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^{n-1} \alpha p^i |\mathbf{n}(f \cdot l^i \mathbf{p})|$$

Les paramètres utilisés par défaut dans nos modèles sont présentés dans le [Tableau 3.1](#).

Primitive	Type de bruit	n	p	l	f
Calme	Gradient	4	0.4	1.98	0.8 – 1.3
Turbulence	Crête	4	0.4	1.98	0.8 – 1.3

Table 3.1 : Les paramètres de bruits pour les primitives calmes et turbulentes utilisées dans notre implémentation. On présente : le type de bruit utilisé, le nombre d'octave (n), la persistance (p), la lacunarité (l) et la fréquence de base (f).

3.2.2.2 Primitives cascade et vague

Les primitives de vagues approximent localement des crêtes et des creux. L'apparition de ces phénomènes est souvent dictée par la topographie du lit de rivière. Les primitives de cascade représentent une vision extrême de ces effets et incluent les bassins de réception attenants.

Pour modéliser ces phénomènes, on mélange une fonction en amont w_u et une fonction en aval w_d . On appelle u_x la position relative à la fonction en amont et en aval. Le flux aval est la fonction de turbulence δh_c et la fonction en amont est la fonction de calme δh_t définies précédemment. La position relative de ces deux fonctions est calculée selon la direction de l'écoulement \mathbf{u} . Les fonctions sont ensuite paramétrées selon la hauteur relative h de la vague ou de la chute.

On a alors pour les cascades :

$$\begin{cases} w_u(\mathbf{p}, t) = e - h \left(\frac{u_x + r}{r} \right)^3 + a_c \delta h_c(\mathbf{p}, \mathbf{u}, t) \\ w_d(\mathbf{p}, t) = e - h + a_t \delta h_t(\mathbf{p}, \mathbf{u}, t), \end{cases}$$

Et pour les vagues :

$$\begin{cases} w_u(\mathbf{p}, t) = e + h \left(1 - \left(\frac{u_x}{r} \right)^2 \right) + a_c \delta h_c(\mathbf{p}, \mathbf{u}, t) \\ w_d(\mathbf{p}, t) = e + h \left(1 - \left(\frac{u_x}{r} \right)^6 \right) + a_t \delta h_t(\mathbf{p}, \mathbf{u}, t). \end{cases}$$

L'opérateur de combinaison est C^2 est défini comme précédemment pour une distance au centre de r :

$$\lambda(r) = g \left(\frac{r + \varepsilon}{2\varepsilon} \right) = \begin{cases} 1 & \text{si } r < -\varepsilon \\ \left(1 - \left(\frac{r + \varepsilon}{2\varepsilon} \right)^2 \right)^3 & \text{si } -\varepsilon \leq r \leq \varepsilon \\ 0 & \text{si } r > \varepsilon, \end{cases}$$

La hauteur de l'eau w et la fonction de mélange α sont définies par :

$$w(\mathbf{p}, t) = \alpha(\mathbf{p}) f_u(\mathbf{p}, t) + (1 - \alpha(\mathbf{p})) f_d(\mathbf{p}, t),$$

$$\alpha(\mathbf{p}) = \lambda(\mathbf{u} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{c})).$$

3.2.2.3 Primitives vortex

Les primitives vortex produisent des tourbillons qui ont lieu par exemple en dessous d'un obstacle submergé tel qu'un caillou. On les représente en appliquant une rotation en fonction de la distance à une primitive de turbulence. La nouvelle position transformée est issue de

la rotation d'un angle ψ autour du centre \mathbf{c} de la primitive. Soit β la vitesse de rotation du siphon, σ l'angle de torsion entre le centre du siphon et les bords et $\mathbf{R}(\psi)$ la rotation d'angle ψ alors on définit :

$$\omega^{-1}(\mathbf{p}, t) = \mathbf{R}(-\psi(\mathbf{p}, t)) \cdot \mathbf{p} \quad \psi(\mathbf{p}, t) = \sigma \|\mathbf{p} - \mathbf{c}\|/R + \beta t.$$

On paramétrise la primitive par sa profondeur maximale h :

$$w(\mathbf{p}, t) = e + a \delta h(\mathbf{p}, t) - h b$$

avec $b = 2^{-8d^2/R^2}$ et $d = \|\mathbf{p} - \mathbf{c}\|$.

3.2.3 Opérateurs animés de combinaison

La force de notre méthode vient de l'expressivité de notre modèle qui permet la combinaison cohérente de nos primitives. Par exemple, une section raide de rivière peut être construite par l'ensemble de primitives calme, cascade, vague et turbulence, comme on peut l'observer [Figure 61](#).

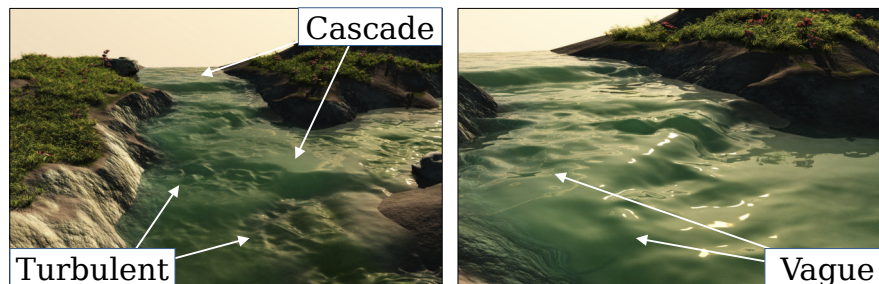


Figure 61 : Deux segments de rivière générés en combinant différents types de primitives.

Nos opérateurs de combinaisons se divisent en deux catégories. Nous utilisons deux opérateurs différents pour combiner nos primitives. Ces opérateurs sont semblables à ceux utilisés pour les terrains mais permettent de prendre en compte l'animation. L'opérateur de mélange permet de combiner les différentes primitives et de créer des transitions lisses. L'opérateur de remplacement est utilisé pour insérer une caractéristique spécifique à un endroit, comme la primitive vortex afin de ne pas déformer la structure du vortex.

3.2.3.1 Opérateur de mélange

Les opérateurs de mélange combinent des primitives animées de rivières en interpolant les hauteurs d'eau, tout comme la vitesse et l'effervescence. Il s'agit du même opérateur n -aire que celui utilisé pour les terrains, à la différence qu'il dépend du temps t .

Pour deux primitives A et B , on définit alors la hauteur de l'eau $w(\mathbf{p}, t)$ en un point \mathbf{p} à un temps t comme :

$$w(\mathbf{p}, t) = \frac{\alpha_A(\mathbf{p}) w_A(\mathbf{p}, t) + \alpha_B(\mathbf{p}) w_B(\mathbf{p}, t)}{\alpha_A(\mathbf{p}) + \alpha_B(\mathbf{p})},$$

et on définit le poids α de la nouvelle primitive par :

$$\alpha(\mathbf{p}) = \alpha_A(\mathbf{p}) + \alpha_B(\mathbf{p}).$$

3.2.3.2 Opérateur de remplacement

L'opérateur de remplacement permet de placer des caractéristiques particulières de l'écoulement d'eau car il est asymétrique. Ainsi, les vortex et les vagues écrasent les surfaces d'eau existantes. Il est ainsi possible de conserver des caractéristiques spécifiques et d'éviter le mélange non réaliste avec d'autres primitives (par exemple entre une turbulence et un siphon). L'opérateur remplace un sous-arbre \mathcal{N}_A avec un autre \mathcal{N}_B , tout en assurant la continuité :

$$w(\mathbf{p}, t) = (1 - \alpha_B(\mathbf{p})) w_A(\mathbf{p}, t) + \alpha_A(\mathbf{p}) w_B(\mathbf{p}, t),$$

et on définit le poids α de la nouvelle primitive par :

$$\alpha(\mathbf{p}) = \alpha_A(\mathbf{p}).$$

Les équations pour la vitesse $\mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$ et l'effervescence $s(\mathbf{p}, t)$ sont similaires. Le mélange de champ de vecteur tel que décrit peut créer des artéfacts visuels. Pour les éviter, nous garantissons en pratique que les primitives du voisinage aient des vitesses similaires. Bien que ces opérateurs ne garantissent pas une exactitude physique, ceux-ci donnent de bons résultats visuels en pratique.

3.2.4 Résultats

Notre modèle permet d'animer un réseau de rivières avec du détail. Contrairement à une simulation, nous ne pouvons qu'approximer le régime permanent avec des phénomènes réguliers ou quasi-périodiques (vaguelettes, rides et ridules, propagation régulière d'onde de choc autour d'un obstacle). Afin de déterminer les caractéristiques de la surface à un point donné \mathbf{p} , on évalue l'arbre de construction en le parcourant récursivement de sorte à trouver les primitives locales qui contribuent à la hauteur d'eau $w(\mathbf{p}, t)$, à la vitesse $\mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$ et à l'effervescence $s(\mathbf{p}, t)$.

Un autre exemple, la [Figure 62](#) montre comment la vitesse et l'effervescence sont utilisées pour améliorer le paysage de la rivière. On déplace ici des éléments extérieurs au modèle,

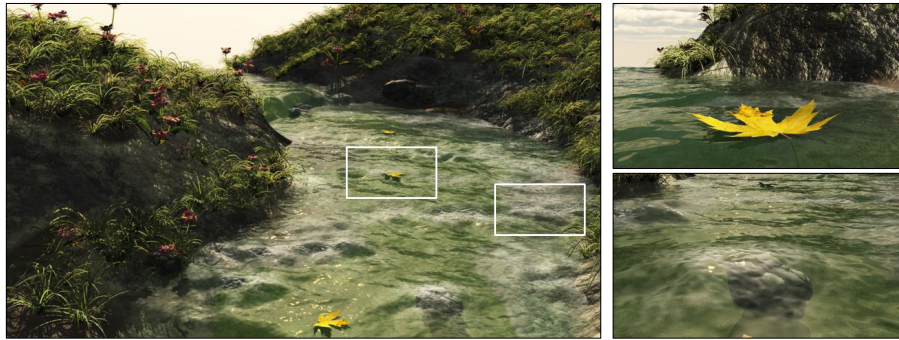


Figure 62 : Impact de la vitesse et de l'effervescence de l'eau sur un paysage de rivière. Une feuille d'arbre flottant sur la rivière est portée de manière cohérente grâce au champ de vitesse. On a également de l'écume à la surface de l'eau près des obstacles.

comme des débris, tels que des feuilles qui suivent le courant ainsi que de l'écume et des bulles autour des obstacles et après les cascades.

Le modèle par primitives à support compact permet une édition intuitive de l'animation et il est par exemple facile d'ajouter du détail localement (**Figure 63**). La modification dynamique de l'arbre d'écoulement pourrait permettre à l'utilisateur d'interagir avec la surface de l'eau.

Notre modèle est performant et peut être utilisé sur CPU et GPU. Notre système est implémenté en C++. Les tests ont été effectués sur un ordinateur de bureau équipé d'un processeur Intel® Core i7, cadencé à 4 GHz avec 16Go de RAM et une carte graphique NVidia GTX 970. Les résultats de notre méthode ont été directement rendus dans le logiciel Vue Xstream® qui produit des images photoréalistes.

Sur CPU, la structure hiérarchique de l'arbre d'écoulement permet d'être utilisée comme structure d'accélération. Cependant, cela n'est pas adapté pour un calcul sur GPU, où nous utilisons à la place des primitives distribuées sur une grille régulière.



Figure 63 : Des détails sont ajoutés en aval des obstacles comme les arbres ou les rochers en ajoutant par édition des primitives de vortex et de turbulence. L'opérateur de remplacement permet de changer l'animation localement.

Nous avons également mis en place une implémentation GPU qui utilise une structure de grille accélératrice et un shader de tessellation. Pour garantir les performances, le recouvrement entre les différentes primitives est défini lors de l'étape de génération de la rivière. Une seule

primitive de flux est placée au centre de chaque cellule de la grille, avec un rayon constant qui se superpose avec son voisinage immédiat. Au maximum quatre primitives se superposent à un endroit donné et elles se combinent grâce à l'opérateur de mélange. La variété des primitives utilisée sur la grille régulière permet de ne pas créer d'artefacts d'alignement. Ensuite, un morceau de terrain est défini pour recouvrir une région carrée de la grille (typiquement, 10×10 cellules par morceau). À l'exécution, notre shader de tessellation élimine les morceaux hors de la vue (frustum culling), effectue une tessellation adaptative des morceaux de terrain en fonction de la distance au point de vue et finalement évalue, à partir de la grille, la hauteur de chaque point. Cette implémentation permet un rendu interactif d'environ 70 images par seconde et une résolution de $1,920 \times 1,080$ pixels pour des scènes comprenant des centaines de milliers de primitives (Figure 64). Plus de détails seront données section 4.4.



Figure 64 : Rendu temps réel d'un réseau de rivières avec 698k primitives de terrain d'eau. Nous obtenons un rendu de 20–80 fps avec les rayons réfléchis et réfractés et les instances de rochers et d'herbes. Sans ces caractéristiques, le rendu est de 48–195 fps.

Nous avons également effectué **une comparaison expérimentale** entre notre modèle et une simulation physique de particules. L'expérimentation s'est passée de la manière suivante : à partir d'un terrain initial nu, un artiste professionnel de l'environnement a créé une scène virtuelle approximant un exemple donné de 30 m^2 . Cela implique de sculpter le terrain et d'effectuer une simulation de fluide de type FLIP (Fluid-Implicit Particle). Les simulations ont été effectuées sur des serveurs avec 64Go de Ram et 2 processeurs Xeon E5-2630 V2 à 2.6Hz.

Pour chaque étape du cycle itératif de création, l'expert passait environ 2h pour créer le lit de la rivière, modifier les paramètres de la simulation et lancer les tests de chaque image individuelle. Il s'en suivait 9 heures de simulation. Cela inclut l'initialisation des particules, la simulation jusqu'à la stabilisation pour obtenir un état pseudo-périodique de la rivière et la génération d'une animation du fluide de 20 secondes. La précision de la simulation est de 3cm, résultant de 4,5 millions de particules et de 200 millions de voxels. Nous avons essayé

de réduire la précision pour limiter les temps d'itération mais cela introduisait de nombreux artefacts et la différence entre surface de l'eau approximée et celle réellement obtenue était tellement décorrélée qu'il était impossible de l'utiliser comme méthode d'édition. Pour finaliser la scène, 15 itérations ont été nécessaires, avec pour chacune 2 heures d'édition et 9h de simulation, soit un total de 165 heures. Notre méthode représente une amélioration très importante en termes de temps de production et d'empreinte mémoire. En comparaison, après une première étape de génération automatique ([chapitre 4](#)), notre modèle permet de modifier interactivement les paramètres des primitives (fréquence, amplitude, hauteur et vitesse). Le processus de création de notre système, en incluant l'ensemble des itérations, nous a pris une heure. La [Figure 65](#) montre les résultats de la méthode de simulation FLIP comparés à ceux de notre méthode.

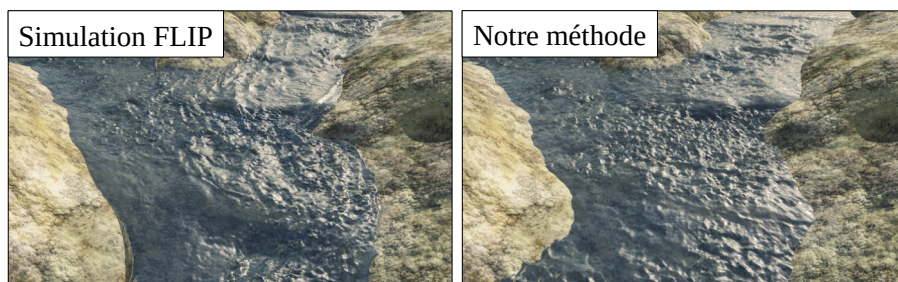


Figure 65 : Comparaison entre une simulation de fluide et notre modèle. Le rendu est effectué après la génération de la géométrie. (Gauche) Une simulation FLIP nécessite 9h de calcul (sans considérer les itérations de modélisation). (Droite) Notre méthode est calculée en temps réel.

3.3 Conclusion

Notre modèle permet de modéliser à l'aide d'arbres de construction un terrain surfacique et un réseau de rivières animé. L'approche par caractéristiques permet de stocker de manière compact un terrain détaillé et varié. L'utilisation d'une animation par phénomènes pseudo-périodiques est léger en mémoire, simple à évaluer et détaillé. La description par placement de primitives permet un contrôle local interactif et intuitif.

Ce modèle peut être étendu de différentes manières. On pourrait notamment imaginer la création de nouvelles primitives ou afin de garantir plus de réalisme, réfléchir à la création de primitives assurant davantage de garanties physiques.

Alors que le contrôle local est un point important du modèle, il peut être difficile de créer un arbre dans sa globalité. Une technique pour créer un terrain à partir d'un réseau a été étudiée [[Gén+13](#)]. Des techniques pour représenter un terrain d'exemple à partir de primitives pour compresser ou amplifier le terrain ont également été mises en place [[Gu16](#)]. Nous proposons dans le [chapitre 4](#), une méthode pour extraire le réseau de rivières d'un

terrain existant et d'ajouter la géométrie des lits et l'animation de l'eau correspondante en utilisant ce modèle.

GÉNÉRATION DES SCÈNES DE RIVIÈRES ANIMÉES



Table des matières

4.1 Bases de potamologie, géomorphologie et hydrologie	76
4.1.1 Du terrain réel au modèle numérique de terrain	77
4.1.2 Calcul sur des surfaces continues	79
4.1.3 Analyse de l'écoulement	81
4.1.4 Géométrie hydraulique	87
4.1.5 Classification de Rosgen	88
4.2 Amplification du réseau hydraulique	88
4.2.1 Construction du graphe hydraulique	90
4.2.2 Processus d'amplification	90
4.2.3 Analyse et ajustement de la trajectoire	91
4.2.4 Creusement du lit de rivière	92
4.2.5 Placement des primitives de flux	95
4.3 Autres applications	96
4.3.1 Amplification de terrains annotés	96
4.3.2 Animation à partir de simulations	97
4.4 Résultats	99
4.4.1 Statistiques pour une scène	99
4.4.2 Performances	100
4.4.3 Contrôle	101
4.4.4 Comparaison avec l'état de l'art	102
4.4.5 Limitations	102

Le modèle de rivière, présenté précédemment, permet de créer des paysages naturels avec des lits de rivières détaillés et une surface de l'eau animée. Ce modèle est constitué d'un arbre de construction pour représenter le terrain et d'un arbre d'écoulement pour l'animation de l'eau. Ceux-ci peuvent être construits par un artiste car le placement par modèle est intuitif, cependant ce travail est long pour de grandes scènes et nécessite de nombreux ajustements pour garantir un écoulement réaliste. De nombreuses études ont permis de lier le terrain, le réseau hydraulique, la géométrie des rivières et l'écoulement. Nous proposons une méthode qui utilise ces connaissances afin d'amplifier un terrain existant en creusant des cours d'eau cohérents et en les animant sur un grand domaine. L'utilisation des règles de géomorphologie garantit la cohérence de l'écoulement. Cette méthode génère automatiquement les arbres de construction de notre modèle de rivière afin de créer des lits de rivières réalistes et une animation de la surface de l'eau détaillée. Le modèle est alors léger en mémoire, facilement éditable et visualisable en temps réel.

Le contrôle est un point clé de ma thèse et afin de correspondre au mieux à l'intention de l'artiste, notre processus peut être édité à différents niveaux d'abstraction : les primitives individuelles peuvent être insérées, retirées ou paramétrées ; le graphe de la rivière peut être édité ; et si nécessaire, le terrain peut être localement remodelé et le réseau de rivières régénéré.

Nous rappelons, dans un premier temps les notions de géoscience nécessaires à la compréhension de notre méthode (section 4.1). Nous présentons ensuite notre méthode d'amplification qui construit un graphe hydraulique sur un terrain existant pour ensuite générer notre modèle de rivière (section 4.2). Nous proposons alors différentes méthodes annexes qui peuvent être utilisées pour compléter notre processus de création (section 4.3). Enfin nous détaillons différents résultats issus de notre méthode de génération. (section 4.4).

4.1 Bases de potamologie, géomorphologie et hydrologie

Les études sur les cours d'eau (potamologie), les reliefs (géomorphologie) et le comportement de l'eau (hydrologie) sont étroitement liées. D'un côté la trajectoire des rivières peut être considérée comme fonction uniquement du relief. D'un autre côté, l'érosion hydraulique est un élément non négligeable de la structure des terrains. Enfin, pour comprendre comment ces phénomènes se produisent, il est nécessaire de comprendre la dynamique de l'eau en surface libre.

Dès l'apparition de l'agriculture, les hommes se sont intéressés à ces éléments de manière conjointe. La potamologie n'a cependant été théorisée qu'en 1925 par PARDÉ [Par25] avec son étude importante sur le Rhône. La géomatique, contraction de géographie et informatique, a développé de nombreux algorithmes utilisant ces connaissances qu'elle regroupe dans des systèmes d'information géographique (SIG). Cette discipline est notamment utilisée dans des

secteurs critiques tels que l'aménagement du territoire, la gestion des risques naturels ou encore les télécommunications.

Nous présentons dans cette section les connaissances de potamologie, de géomorphologie et d'hydraulique fluviale que nous utilisons dans la suite du manuscrit.

4.1.1 Du terrain réel au modèle numérique de terrain

Cette première partie est une rapide introduction à la notion de terrain et de carte d'élévation. Il est important de noter que des restrictions seront faites puisque l'on considère des terrains sur un domaine défini qui ne présente aucune caractéristique 3D tels les surplombs, les grottes et les arches. Nous considérons dans un premier temps le terrain comme la surface visible du monde. Cette partie est très développée en géo-informatique[MGL91 ; LZG04 ; Lon05].

4.1.1.1 Terrain réel

Soit un terrain réel \mathcal{T} sur une région compacte $\Omega \in \mathbb{R}^2$ appelée domaine, on appelle élévation réelle, la fonction z pour tout point \mathbf{p} du domaine défini par $\forall \mathbf{p} \in \Omega, z(\mathbf{p}) = z_{\mathbf{p}}$ avec $z_{\mathbf{p}} \in \mathbb{R}$. On notera par convention $z = 0$ le niveau de la mer. On obtient alors une surface paramétrée telle que $z : \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ dont le support géométrique est le terrain. Les terrains utilisés sont des 2-manifolds. Il est alors possible d'effectuer du calcul différentiel. Un des objectifs est donc de définir des opérateurs pour calculer la dérivé ou la courbure sur les terrains numériques afin de calculer au mieux les éléments constituant le terrain. Les concepts que nous utilisons sont physiques et il est recommandé d'utiliser les grandeurs réelles.

4.1.1.2 Acquisition

Les méthodes d'acquisition des terrains ne permettent pas d'obtenir $z(\mathbf{p})$ sur l'intégralité du domaine Ω et induisent des erreurs de mesure et de quantification \mathcal{Q} . Le domaine Ω est alors échantillonné suivant une fonction dépendante de la méthode d'acquisition ou de la création du terrain.

Soit \mathcal{Q} la fonction qui regroupe l'erreur de quantification et de mesure. L'erreur maximale $\epsilon_z = \max_{\mathbf{p} \in \Omega_s} |z(\mathbf{p}) - \mathcal{Q}(z_s(\mathbf{p}))|$ est définie comme la différence entre la valeur d'élévation issue de l'échantillonnage mesuré et quantifié et la valeur réelle. Nous ne nous intéresserons pas aux problèmes de mesure d'élévation et de quantification bien que ceux-ci puissent jouer un rôle perturbateur important et $\epsilon_z = 0$.

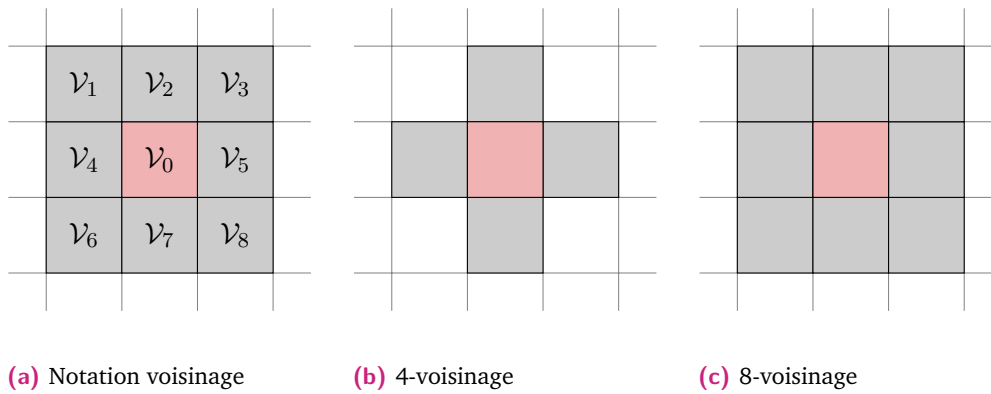


Figure 66 : Voisinage usuel d’une grille régulière. La régularité permet de définir le voisinage de manière simple. Les pavages carrés ne partagent pas d’arêtes communes avec tout leur voisin et donc deux voisinages existent.

4.1.1.3 Création d’un Modèle Numérique de Terrain

Dans le cas où l’échantillonnage permet d’obtenir les élévations sur une grille régulière carrée \mathbf{G} , définissant le domaine $\Omega_g = \Omega \cap \mathbb{Z}^2$, on parle de Modèle Numérique de Terrain. Ce modèle permet de créer un ensemble de cellule C_{ij} . Cette représentation est très utilisée dans les SIG. Il est important de comprendre que la numérisation des terrains passe par de nombreuses étapes qui rendent l’extraction d’informations difficile.

Les grilles régulières carrées permettent de définir deux types de voisinage. Le 4-voisinage, aussi appelé voisinage de von Neumann, correspond à l’ensemble des 4 cellules adjacentes à une cellule (horizontalement et verticalement). Le 8-voisinage, aussi appelé voisinage de Moore d’ordre 1, correspond à l’ensemble des 8 cellules adjacentes à une cellule (diagonale comprise). Nous proposons une notation du voisinage visible **Figure 66**.

Une fonction d’interpolation permet de définir le terrain continu sur le domaine Ω . Il est fréquent d’utiliser les interpolations bilinéaires et bicubiques. Cette dernière garantit un terrain de continuité C^2 et facilite le calcul différentiel. ZEVENBERGEN et al. [ZT87] définissent ainsi les équations d’interpolation bicubique (Équation 4.1) pour le terrain. À partir des notations

du voisinage définies précédemment, pour une grille de résolution L et en notant $z_i = z(\mathcal{V}_i)$, l'équation de la surface bicubique s'écrit :

$$\forall (x, y) \in \mathcal{V}_0, z(x, y) = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

$$\text{avec : } \begin{cases} A = [(z_1 + z_3 + z_6 + z_8)/4 - (z_2 + z_4 + z_5 + z_7)/2 + z_0]/L^4 \\ B = [(z_1 + z_3 - z_6 - z_8)/4 - (z_2 - z_7)/2]/L^3 \\ C = [(-z_1 + z_3 - z_6 + z_8)/4 + (z_4 - z_5)/2]/L^3 \\ D = [(z_4 + z_5)/2 - z_0]/L^2 \\ E = [(z_2 + z_7)/2 - z_0]/L^2 \\ F = (-z_1 + z_3 + z_6 - z_8)/4L^2 \\ G = (-z_4 + z_5)/2L \\ H = (z_2 - z_7)/2L \\ I = z_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Les cartes d'élévation permettent d'extraire un grand nombre d'informations sur le terrain dont certaines s'éloignent de la géométrie usuelle : il est par exemple possible d'extraire des informations d'écoulement.

Les modèles numériques de terrain permettent de manipuler facilement et rapidement la surface des terrains.

4.1.2 Calcul sur des surfaces continues

Le terrain \mathcal{T} est la représentation de z dans \mathbb{R}^3 . Il est possible de calculer un ensemble de caractéristiques propres aux surfaces, telles la pente et la courbure en tout point. Ces méthodes sont développées dans la littérature des systèmes d'information géographique (GIS) [BM99]. Ces méthodes d'origine géométrique sont notamment utilisées afin de prévoir les écoulements, l'érosion ou encore la propagation des incendies. Le choix des méthodes de calcul de ces grandeurs est très important. Des travaux ont évalué l'impact de ce choix [Ski89 ; DH98].

4.1.2.1 Différentielle première et pente

La pente est définie comme le plan tangent à un point de la surface. Cette mesure est liée à la dérivée principale de la surface. Elle est caractérisée par deux composantes :

1. Le gradient est la variation maximale du plan avec l'horizontal. Il est aussi possible de parler de l'angle de la pente (Figure 69). Il s'exprime en degré ou en pourcent.
2. La direction aussi appelée aspect, orientation ou plus communément exposition, désigne usuellement l'angle entre le nord et la direction de la plus grande pente.

Différentes méthodes de calcul de ces grandeurs ont été développées et elles sont discutées par DUNN et al. [DH98]. La méthode de la surface quadratique, [Équation 4.1](#), permet de calculer facilement ces informations.

L'exposition e d'angle θ se calcule par :

$$\cos \theta = \sqrt{-G/(G^2 + H^2)} \quad \sin \theta = \sqrt{-H/(G^2 + H^2)}$$

La pente s se définit par :

$$s = \frac{\partial z}{\partial e} = G \cos \theta + H \sin \theta = -\sqrt{G^2 + H^2}$$

4.1.2.2 Différentielle seconde

La courbure se retrouve à partir de la dérivée seconde de la surface. Pour les terrains, elle donne des informations sur la physique des bassins de drainage. Les valeurs de courbures définissent en effet les motifs d'érosion du sol mais aussi la distribution de l'eau.

On définit pour les GIS deux types de courbures. Les méthodes de calcul que nous proposons s'appuient sur les équations de la surface quadratique, [Équation 4.1](#) :

La courbure longitudinale ψ est dans le sens de la plus grande pente. Elle influence la dynamique de l'eau (accélération et décélération du flux) et donc l'érosion et la sédimentation ([Figure 67](#), gauche) :

$$\psi = -2 \frac{DG^2 + EH^2 + FGH}{G^2 + H^2}$$

La courbure transversale ω aussi appelée planiforme est orthogonale à la précédente. Elle décrit la convergence et la divergence des flux ([Figure 67](#), droite) :

$$\omega = 2 \frac{DH^2 + EG^2 + FGH}{G^2 + H^2}$$

Les courbures calculées sont issues de la courbure ξ qui est le Laplacien (∇^2) de la fonction d'élévation z :

$$\xi = \omega - \psi = 2E + 2D$$

Outre les éléments de calcul différentiel qui peuvent être utilisés pour extraire de l'information sur les cartes de hauteurs, des techniques spécifiques aux terrains ont été développées.

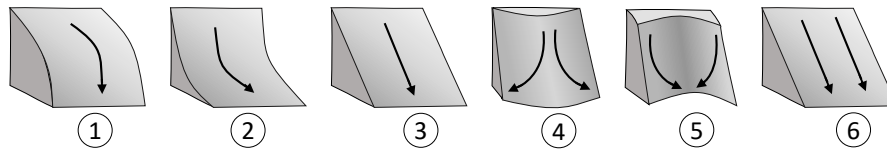


Figure 67 : La courbure des terrains permet d'obtenir des informations sur le réseau hydraulique. En effet, la courbure longitudinale (1-3) qualifie la force d'érosion et la courbure planiforme (4-6) détermine la divergence du flux.

4.1.3 Analyse de l'écoulement

L'écoulement de l'eau impacte fortement le terrain à différentes échelles. Il érode les terrains, crée les vallées, creuse les rivières mais participe également à la formation de la flore et à la répartition de la faune.

L'étude de l'écoulement est donc très importante pour caractériser un paysage naturel. Nous présentons différentes dénominations usuelles et leur définition puis différentes grandeurs caractéristiques des terrains et des rivières. Bien que l'eau modifie fortement le terrain nous pouvons considérer, sur l'échelle de temps étudié, que le terrain n'est pas affecté par l'écoulement de l'eau.

4.1.3.1 Éléments des paysages de rivières

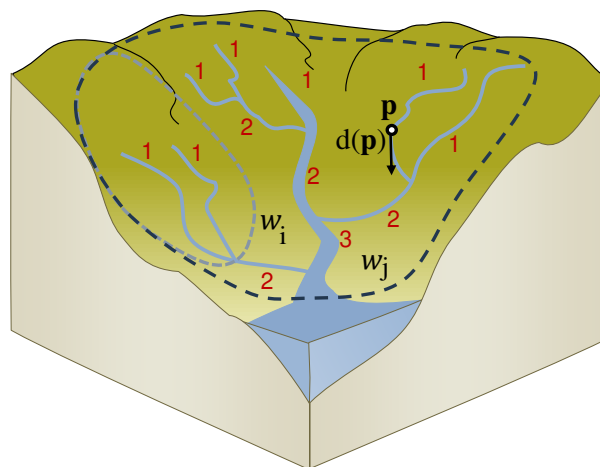


Figure 68 : La direction d'écoulement $d(\mathbf{p})$ permet de définir les bassins versants $\mathcal{W}_i \subset \mathcal{W}_j$ des terrains. Le nombre de Horton-Strahler est défini en rouge pour chaque tronçon de rivière.

Le premier élément à définir pour caractériser l'hydrologie du terrain est la direction d'écoulement $d(\mathbf{p})$ en tout point \mathbf{p} du terrain (Figure 68). Cette information caractérise la direction prise par un élément d'eau, telle une goutte, qui tomberait sur le terrain. Les méthodes usuelles de calcul de direction supposent que cette direction ne dépend que du relief et donc négligent les autres aspects comme l'impact de la composition du sol [DB70 ; Qui+91 ;

BW83]. Le choix de ces directions est beaucoup étudié en hydrologie et il est important de noter que dans le domaine discret la direction d'écoulement n'est plus aussi simple à définir. En effet, pour une même cellule C_i définir une seule direction d'écoulement ne permet pas de capter la complexité de l'écoulement. En effet, il ne serait, par exemple, pas possible de prendre en compte la divergence du flux. Pour éviter cela, nous définissons $\phi_{i \rightarrow j}$ le ratio d'eau passant d'une cellule i à une cellule j . Différents algorithmes du calcul de la direction sont proposés puis discutés [partie 4.1.3.2](#).

L'étude de ces directions sur l'ensemble du terrain permet de faire émerger trois cas : si aucune direction n'est définie en un point, l'eau stagne et ce point définit un puits ; si une direction sort du terrain ou alors passe sous le niveau de l'eau, il s'agit d'un exutoire (nous considérons l'ensemble des exutoires comme un même et unique point) ; enfin si un point du terrain ne reçoit pas d'eau du reste du terrain, on dit qu'il s'agit d'une source.

La trajectoire $\Gamma(\mathbf{p})$ correspondant à l'ensemble des points parcourus, en suivant la direction d'écoulement, par un élément d'eau depuis une position \mathbf{p} jusqu'à un exutoire \mathbf{x} :

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \int_{\mathbf{p}}^{\mathbf{x}} d(\mathbf{q})d\mathbf{q}$$

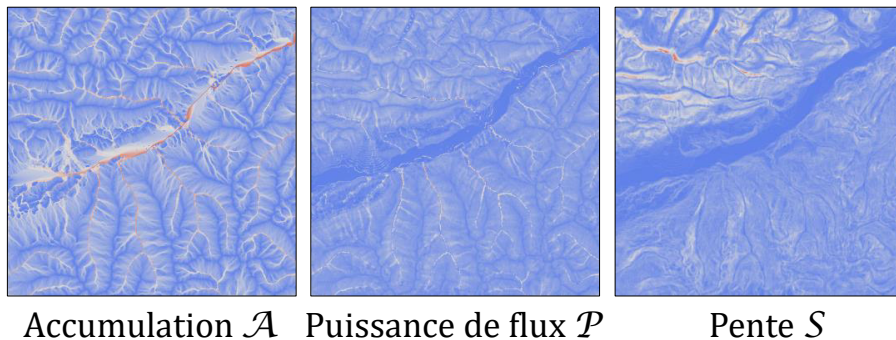


Figure 69 : Les paramètres caractérisant les différentes parties du réseau de rivières sont : la pente S et la puissance du flux \mathcal{P} qui définit la force d'érosion, tandis que l'aire de drainage \mathcal{A} représente le volume du flux.

La trajectoire permet de calculer l'**aire de drainage ou accumulation** $\mathcal{A}(\mathbf{p})$ [m^2] en tout point du terrain ([Figure 69](#)). Cette grandeur pour un point \mathbf{p} correspond à la zone du terrain telle que, pour tout élément d'eau sur cette zone, l'eau passera par le point \mathbf{p} . On a alors :

$$\mathcal{A}(\mathbf{p}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{q})d\mathbf{q} \quad \text{avec} \quad f(\mathbf{q}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{p} \in \Gamma(\mathbf{q}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Sur une grille régulière l'accumulation $\mathcal{A}(i)$ est définie pour toutes les cellules du terrain C_i , pour la calculer FREEMAN [Fre91] propose :

$$\mathcal{A}(i) = \sum_{j=0}^8 (\mathcal{A}(j) + a) \times \phi_{j \rightarrow i}$$

avec j désignant le 8-voisinage de i et a l'aire d'une cellule.

L'ensemble des trajectoires forme un arbre couvrant (si l'ensemble des puits et des exutoires est considéré comme un même et unique nœud). La discrétisation du terrain \mathcal{T} sur la grille \mathbf{G} implique qu'une cellule peut s'écouler sur différentes cellules. Il n'est alors plus possible de parler d'arbre d'écoulement et on définit un graphe d'écoulement discret complet. Ce graphe orienté pondéré lie chaque cellule du MNT en fonction des directions d'écoulement. Le poids de l'arête définit la portion de flux circulant d'un nœud à l'autre. Il est important de différencier les méthodes qui permettent de créer des arbres et celles permettant de créer des graphes. En définissant un seuil, le graphe varie selon sa valeur d'accumulation, On obtient le graphe d'écoulement discret \mathcal{D} .

L'aire de drainage permet de définir l'**indice d'humidité** $w(\mathbf{p})$ qui caractérise l'humidité des régions du terrain [BK79 ; Qui+91] :

$$w(\mathbf{p}) = \ln (\mathcal{A}(\mathbf{p})/S(\mathbf{p}))$$

Ce coefficient n'est pas défini sur les zones plates et on utilisera une fonction modifiée, selon un coefficient $k \in \mathbb{R}^+$:

$$w(\mathbf{p}) = \ln (\mathcal{A}(\mathbf{p})/(1 + k S(\mathbf{p})))$$

La **puissance de flux** $\mathcal{P}(\mathbf{p})$ est utilisée pour caractériser l'érosion (Figure 69), on a :

$$\mathcal{P}(\mathbf{p}) = \mathcal{A}(\mathbf{p})^{1/2}/S(\mathbf{p})$$

Le débit ϕ est la mesure du taux volumique auquel l'eau est acheminée en bas de la rivière. Ce paramètre est difficile à établir car il dépend de la composition des sols mais aussi car il varie dans le temps en fonction la pluviométrie. Nous utilisons un modèle simplifié basé sur une loi de puissance empirique observée en géomorphologie [Dun78]. À partir d'une aire de drainage A_{ij} [m^2], le débit ϕ_{ij} de la rivière [$m^3 s^{-1}$] est approximé par

$$\phi = 0.42\mathcal{A}^{0.69}$$

Cette équation prend en compte l'évaporation et les infiltrations qui sont les principales raisons de la non-préservation du volume.

Enfin l'**ordre d'écoulement** o aussi appelé *Nombre de Strahler* est une grandeur, introduite par HORTON en 1945 [Hor45] et reprise par STRAHLER en 1957 [Str57]. Elle permet de

caractériser des morceaux de canal. Il existe plusieurs façons de calculer cette grandeur mais l'objectif est de caractériser le nombre de jonctions nécessaires avant de parvenir à un segment donné du cours d'eau. Pour calculer le nombre de Strahler, il est possible de le calculer tel que :

$$o = \max(o_i, o_j) + \delta_{ij} \quad \text{avec } \delta_{ij} \text{ le symbole de Kronecker}$$

Les **bassins-versants** \mathcal{W} drainent l'eau de toute une surface vers un exutoire commun. Les frontières des bassins versants forment des lignes de crêtes, aussi appelées lignes de partage des eaux. Si un point \mathbf{q} se situe en amont d'un point \mathbf{p} alors son bassin-versant $\mathcal{W}(\mathbf{q})$ est inclus dans le bassin-versant de \mathbf{p} , $\mathcal{W}(\mathbf{p})$ (Figure 68).

$$\mathbf{p} \in \Gamma(\mathbf{q}) \implies \mathcal{W}(\mathbf{q}) \subset \mathcal{W}(\mathbf{p})$$

4.1.3.2 Calcul des directions d'écoulement

Afin de définir le graphe hydraulique, il est nécessaire de définir la direction d'écoulement en tout point du terrain. Les méthodes traditionnelles sont dites déterministes car elles ne dépendent que du terrain et du voisinage local des différentes cellules. Nous avons également étudié une méthode de calcul du réseau global afin de permettre un meilleur contrôle de la création.

Méthodes déterministes On appelle méthodes déterministes un ensemble de méthodes où la direction d'écoulement dépend uniquement de la hauteur du 8-voisinage. Certaines méthodes utilisent également une connaissance a priori du réseau hydraulique préexistant, parfois pour calculer le graphe d'écoulement [Tur+01] ou alors pour préparer le terrain. Ces méthodes ont été développées en géomorphologie sur des terrains issus du réel et sont beaucoup étudiées. Cependant elles ne fonctionnent que si le terrain n'a pas de minimum local. Les méthodes dites par *suivi de flux* (*stream burning*), de *remplissage* (*filling*) ou de *brèche* (*breaching*) permettent de modifier le terrain [WLB16] afin d'assurer un écoulement sur l'ensemble du domaine.

Les méthodes par suivi de flux utilisent une connaissance a priori sur le réseau hydrographique [Sau99]. Les hauteurs sont ainsi limitées le long des lignes de cours d'eau afin de maintenir une descente uniforme locale. Cette méthode assure également que l'eau s'écoule dans la vallée souhaitée.

Les méthodes de remplissage permettent de remplir les minimums locaux jusqu'à la plus proche dépression en simulant ainsi le débordement. Elle a été beaucoup étudiée dans le domaine de l'hydrologie [OM84 ; JD88 ; VS91 ; PD02 ; WL06]. Ces méthodes permettent aussi de prendre en compte la priorité du flux [SG94 ; WL06].

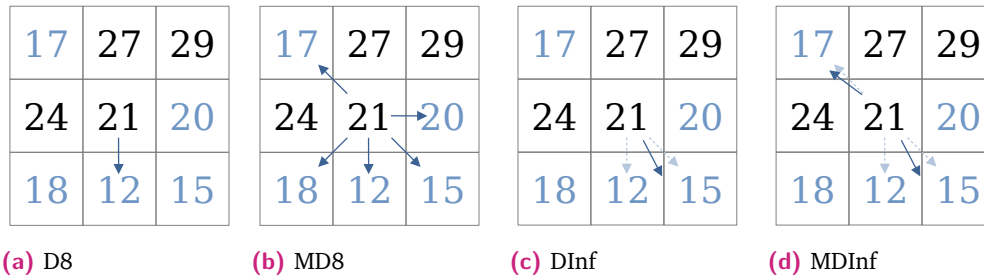


Figure 70 : Comparaison des méthodes déterministes. (a) La méthode de D8 transmet l'intégralité du flux dans une unique direction, celle de la plus grande pente. (b) La méthode MD8 définit un flux pour tous les voisins à plus basse altitude. (c) La méthode DInf définit une direction autre que le 8 voisinage et transmet le flux en fonction de cette direction. (d) La méthode MDInf définit un ensemble de direction où du flux s'écoule et donc permet de prendre en compte les zones de terrain divergentes.

A l'inverse du remplissage, les méthodes de brèche creusent dans le terrain pour assurer une pente pour toutes les cellules jusqu'à un point en contrebas [Rie98]. Des méthodes combinant les avantages des différentes méthodes ont été proposées [BLM14 ; Lin16].

Une fois le terrain conditionné, différentes méthodes déterministes ont été proposées pour définir la direction d'écoulement (Figure 70).

La méthode dite *D8* [OM84] est proposée en 1984 et définit la direction comme étant la direction de la plus grande pente. Dans le cas où plusieurs directions seraient à pentes égales, une seule des pentes est choisie. Le flux ne se divise jamais et 100% de celui-ci est transmis à une cellule. Le choix de cette méthode garantit la création d'un arbre. Cependant, elle ne permet pas de créer des deltas et surtout le flux se concentre souvent en lignes droites.

La méthode précédente distribuait l'intégralité du flux à une seule cellule, cela créait alors des irrégularités dans le terrain et le calcul de l'aire de drainage est donc faussé. La technique du MD8 [Fre91 ; Qui+91 ; QBL95] transmet l'écoulement d'une cellule à l'ensemble des cellules adjacentes de plus faible élévation. La répartition se fait proportionnellement à l'ensemble des pentes descendantes de sorte à conserver le volume du flux. Si $s_i, i = 1, 2, \dots, 8$ représente la pente avec les cellules adjacentes alors le calcul de l'accumulation des flux $\phi_{C \rightarrow C_i}$ de C à C_i est défini par :

$$\phi_{C \rightarrow C_i} = \max(0, s_i) / \sum_{j=0}^{j=8} \max(0, s_j).$$

Cette méthode permet d'obtenir des résultats pour l'aire de drainage de meilleure qualité, cependant il n'existe pas de direction à proprement parler d'écoulement. De plus, dans le cas d'une pente convergente, le flux se disperse sur l'ensemble des cellules de plus basses élévations et ne prend donc pas en compte l'information de convergence. Pour diminuer la dispersion, un exposant de 4 – 6 sur la valeur de la pente permet de privilégier une direction [Hol94].

Afin d'éviter la dispersion mais également l'apparition de lignes parallèles, la méthode de D_∞ [Tar97] calcule l'écoulement dans une seule direction qui ne se limite pas au 8-voisinage

discret. Les facettes triangulaires formées par le 8-voisinage permettent de définir la plus grande pente suivant une orientation continue. La direction est alors un angle et le flux se propage sur une ou deux cellules adjacentes proportionnellement à l'angle. Cette méthode définit donc une unique direction, même si elle est continue et ne permet pas de représenter les paraboloides hyperboliques.

Pour représenter ces surfaces, la méthode la plus efficace est dite de MD_{∞} [SM07]. Cette méthode combine les avantages du D_{∞} et du MD8. Cette méthode permet de représenter la convergence des flux mais aussi de diviser le flux si cela est cohérent. Cette méthode ne permet pas d'obtenir un arbre d'écoulement mais un graphe d'écoulement.

Des méthodes complexes telles que l'algorithme DEMON [CCB94] sont parfois utilisées mais ces algorithmes sont complexes à mettre en œuvre. Différentes comparaisons des algorithmes déterministes ont été proposées : [Ers+06 ; WIL+08 ; RKL14].

Plus court chemin Les méthodes précédentes proposent des directions d'écoulement locales pour tout point du terrain. Cette contrainte de voisinage impose un réalisme du terrain et donc souvent un pré-traitement.

On propose dans cette partie une méthode de plus court chemin pour définir les directions d'écoulement. Des problèmes de plus court chemin anisotrope sur des domaines continus ont été étudiés dans le cadre de création de route [Gal+10 ; Gal+11]. Cette méthode a l'avantage de définir un trajet d'écoulement global. A la différence des méthodes précédentes, il n'y a pas que le relief qui est pris en compte dans cette méthode, la courbure de la trajectoire est aussi prise en compte. À partir de points de source, l'objectif est de trouver un chemin pour relier un point d'exutoire. Chaque point source est indépendant des autres.

Le graphe pour effectuer la recherche peut être implicite et créé depuis le MNT ou peut être défini par l'utilisateur.

Une première méthode consiste à définir le graphe planaire géométrique formé par les cellules de la grille et son 8-voisinage. Le coût est défini comme fonction de la pente. Cette méthode permet de trouver le chemin qui maximise la descente et minimise la montée. Une seconde méthode utilise une grille 3D. Le parcours est obligatoirement décroissant et le coût dépend de la matière à ajouter ou à retirer pour créer la rivière. La dernière méthode envisagée utilise un graphe 2D et un ensemble de symboles disposant d'un point d'entrée et d'un point de sortie. Le chemin se définit alors comme un ensemble de symboles se succédant. Le coût dépend alors de l'attache du symbole au terrain mais également du symbole précédent, permettant une cohérence dans l'écoulement.

Ces méthodes permettent de trouver la trajectoire des rivières sur un terrain même si celle-ci ne devrait pas exister. Ce travail a pour but d'aider les artistes à créer un réseau sur un terrain sans réseau hydraulique. En effet, dans le cas de données de terrain réel, les méthodes issues de l'hydrographie permettent d'obtenir des résultats réalistes. Cependant sur des terrains

procéduraux, ces méthodes ne donnent pas de résultats cohérents. Les méthodes de plus court chemin permettent une cohérence globale et un contrôle important. L'utilisation de symboles permet également de faire apparaître des caractéristiques telles que des méandres ou des bras morts.

Ces travaux n'ont pas mené à une publication.

4.1.4 Géométrie hydraulique

Des travaux ont permis d'établir des lois entre les différents paramètres hydrauliques et la physiographie de la rivière [LM53 ; MB], mais également entre le support de l'eau et son animation [Car98 ; GL]. Ces travaux permettent de décrire la vitesse du flux en fonction des méandres mais également la forme du lit de la rivière (Figure 71). Les rivières s'étudient selon la coupe longitudinale, la coupe transversale et la vue en plan. La coupe longitudinale représente l'élévation le long de la trajectoire, en fonction de la concavité, il est possible de caractériser l'érosion et donc la stabilité de la rivière. Cette coupe permet d'observer les cascades et donne une indication sur la vitesse moyenne de l'eau. La vue du dessus caractérise la trajectoire dans le plan et donc la sinuosité et le niveau de méandre. Les méandres se caractérisent selon le rayon de courbure, la longueur d'onde et l'amplitude. Enfin la coupe transversale définit la forme du lit de rivière, son niveau de symétrie ainsi que son encaissement dans le terrain.

L'hydraulique des cours d'eau permet alors de définir la distribution de vitesse en fonction de ces différents profils et de la rugosité du sol, appelé coefficient de Strickler [GL]. Ces éléments ont commencé à être utilisés en informatique graphique pour représenter la ligne d'eau d'un ruisseau en suivant une coupe longitudinale [DN01].

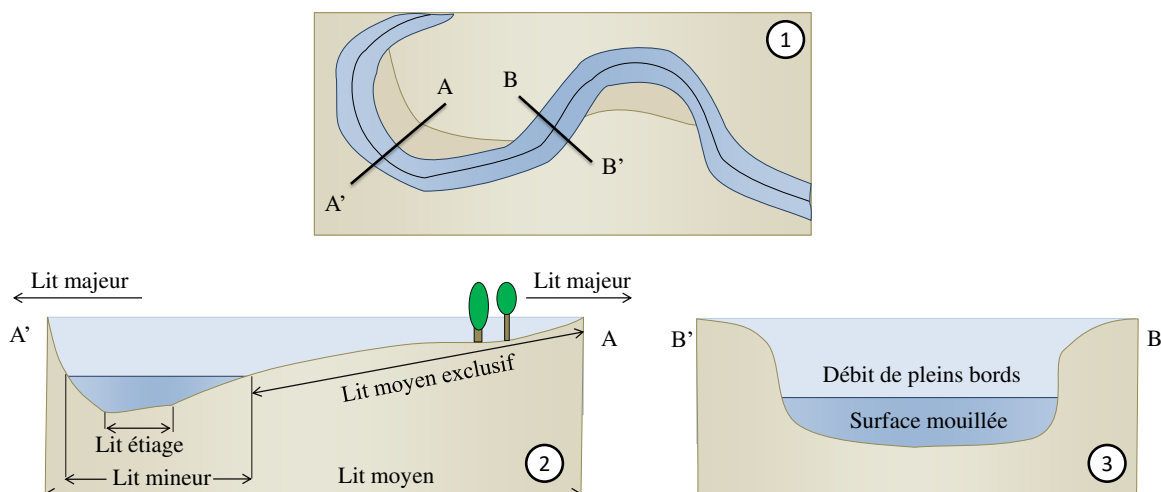


Figure 71 : Noms des différents éléments constituant les rivières. (1) Vue de dessus, on observe la trajectoire de la rivière, des méandres et de l'accumulation de sable dans les zones de forte courbure. (2) Profil asymétrique dans un méandre, les différents lits de rivières sont présentés. (3) Coupe symétrique dans les lignes droites.

4.1.5 Classification de Rosgen

Il existe des corrélations entre les grandeurs des différentes vues de la géométrie des cours d'eau et en 1994, ROSGEN propose une classification abiotique des rivières en 4 niveaux [Ros94 ; Ros96]. Le premier niveau est composé de 9 grands groupes, permettant de relier les différentes coupes géométriques de la rivière. Ainsi, il lie le ratio profondeur/largeur de la rivière, la pente et la sinuosité. Les rivières de montagnes, par exemple, sont relativement étroites et peu sinueuses. Elles se situent dans les zones à forte pente. À l'inverse les rivières de plaines sont soit méandreuses, soit en tresses (Figure 72). Il raffine ensuite la classification à 94 lits de rivières allant de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres. La classification comporte également des indications sur les matériaux constituant les cours d'eau. Il s'agit essentiellement de données visuelles et peu d'importance est donnée au fonctionnement physique. Des travaux s'intéressent à la classification automatique des rivières [Bes+09]. GÉNEVAUX propose un enchaînement naturel des différents groupes de rivières dans sa thèse [Gén15].

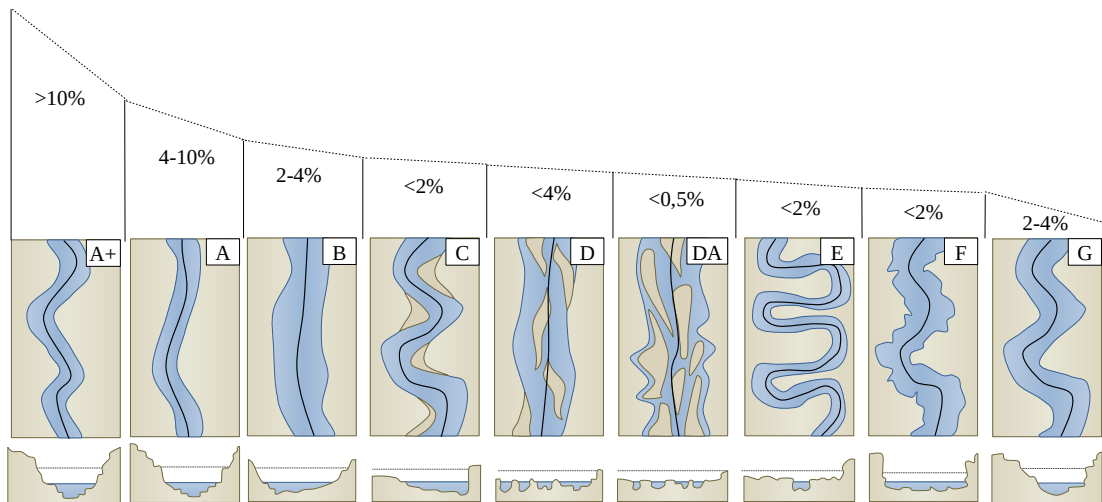


Figure 72 : Présentation des types de Rosgen (A+, A, B, C, D, DA, E, F, et G) avec leur archétype de trajectoire \mathcal{E} . La classification est basée à la fois sur la pente, la trajectoire longitudinale et la coupe transversale des rivières qui existent dans la nature.

4.2 Amplification du réseau hydraulique

Nous proposons une méthode pour créer automatiquement notre modèle de rivière sur un terrain initial grossier. Notre stratégie principale repose sur des archétypes pour construire la géométrie des lits de rivières et le comportement de la surface de l'eau. L'étude des disciplines de géosciences a montré que les cours d'eau peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leurs paramètres hydrauliques et qu'il est alors possible d'en déduire une géométrie de terrain plausible. Nous utilisons ces informations pour générer les lits des rivières sur le terrain. La surface de la rivière est dans un état de stabilité lorsque le débit est constant,

avec un volume relativement constant d'eau entrant et sortant. De petites perturbations aléatoires pseudo-périodiques apparaissent et peuvent être modélisées. Par exemple, le sillage perpétuel de l'eau derrière un rocher immergé varie légèrement dans sa forme mais pas dans sa position. Les mouvements sont aussi principalement en 2, 5D avec localement l'apparition de phénomènes types tels que des tourbillons, des ondulations ou de petites cascades. Plutôt que d'utiliser des simulations de fluides avec les problèmes inhérents de mise à l'échelle, nous combinons des primitives procédurales animées pour représenter ces schémas cycliques.

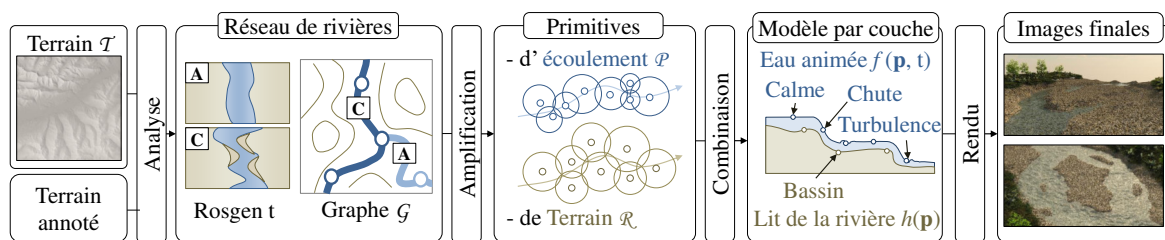


Figure 73 : À partir d'un terrain 2, 5D , les informations d'écoulement sont extraites automatiquement. Le réseau de rivières est alors défini et chaque tronçon de rivière est typé selon la classification de Rosgen. La pente, le volume d'eau et la vitesse d'écoulement dans chaque cellule de la carte permettent d'amplifier le terrain et de créer la surface de l'eau en positionnant automatiquement et de manière cohérente des primitives pour l'arbre de construction de terrain et pour l'arbre d'écoulement. Le lit de la rivière est ainsi intégré dans le terrain et la surface de l'eau s'anime.

La création s'effectue en trois étapes (Figure 73). Dans un premier temps, l'analyse du terrain et les connaissances a priori en potamologie et en géomorphologie permettent de créer un graphe hydraulique varié et cohérent. Il définit ainsi la trajectoire des rivières, la pente moyenne, le débit et la classification de Rosgen de chaque tronçon de rivière. Dans un second temps, des profils dépendants de la classification de Rosgen sont utilisés pour placer des primitives de terrains et d'eau. Nous utilisons pour cela des coupes transversales détaillées préalablement définies et des règles sur le profil longitudinal. Les arbres de construction et d'écoulement ainsi créés permettent de respectivement modifier le terrain en sculptant le lit de la rivière lors de l'évaluation de l'arbre et de définir la surface de l'eau et son animation en adéquation avec le terrain modifié. Cette méthode est la première à proposer une création conjointe du lit de la rivière et de l'animation géométrique de l'eau.

La structure et l'animation de la rivière ainsi créées peuvent être éditées interactivement par l'utilisateur qui positionne et ajuste les éléments procéduraux de la scène. À la place d'appliquer une simulation, nous utilisons une approche phénoménologique qui utilise une méthode procédurale pour approximer l'écoulement souhaité de la rivière. On obtient alors des résultats qui sont visuellement réalistes et cohérents plutôt que physiquement corrects. Cela nous permet d'avoir une animation sur une très grande longueur de rivière mais également un résultat très détaillé. De plus l'utilisateur a un contrôle interactif sur l'ensemble des éléments de la scène pendant la phase d'édition. Il a également la possibilité d'ajouter des effets dynamiquement tels que les vagues de bateaux ou un impact de projection durant l'exécution.

4.2.1 Construction du graphe hydraulique

Il est rare de disposer d'un graphe de rivières avec les paramètres requis pour amplifier le réseau de rivières d'un terrain initial donné. Plutôt que de confier ce processus laborieux de création et labellisation à un utilisateur, nous proposons un processus d'analyse procédurale du réseau hydraulique (Figure 74) qui n'utilise que le relief du terrain.

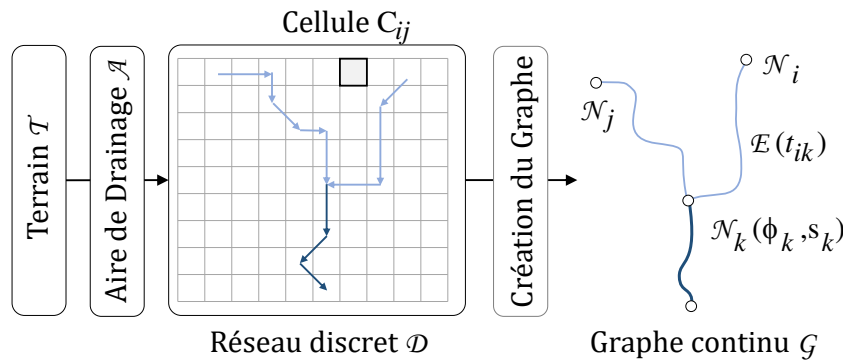


Figure 74 : Présentation de l'extraction du réseau de rivières : On extrait tout d'abord la carte de hauteur du terrain puis on calcule le réseau hydraulique discret \mathcal{D} . Celui-ci est ensuite converti en un graphe \mathcal{G} comprenant le débit ϕ_k et la pente s_k pour chaque nœud \mathcal{N}_k . Cela nous permet également de définir le type de Rosgen t_{ik} pour chaque arête \mathcal{E}_{ik} .

L'analyse procède de la manière suivante : étant donné un terrain \mathcal{T} sur une grille régulière carré C_{ij} , on génère, en premier lieu, un réseau de rivières discret \mathcal{D} . On le convertit ensuite en un graphe continu \mathcal{G} représentant le réseau hydraulique. Les valeurs de l'écoulement sont contenues dans les nœuds et les arêtes et sont utilisées pour amplifier le réseau de rivières (section 4.2).

Pour créer le graphe discret \mathcal{D} , nous utilisons le calcul de l'aire de drainage tel que défini par FREEMAN [Fre91] qui utilise la variante du flux multiple MD8 afin de considérer la divergence du flux. Un seuil sur l'accumulation permet de créer le graphe hydraulique. Le réseau discret de rivières est ensuite converti en un graphe continu \mathcal{G} . Chaque cellule avec plus d'un contributeur forme un nœud du graphe. Les trajectoires des rivières sont lissées entre les nœuds en utilisant des splines cubiques par morceaux. On ajoute aux nœuds les valeurs de la pente du terrain s et le débit de la rivière ϕ de la cellule correspondante. Le calcul des caractéristiques moyennes suivantes pour chaque tronçon : débit, puissance du flux et nombre de Horton-Strahler, permet de définir la classification de Rosgen [Ros94] de chaque arête du graphe.

4.2.2 Processus d'amplification

À partir d'un réseau de rivières sous la forme d'un graphe \mathcal{G} , nous générons automatiquement une trajectoire détaillée de la rivière, creusons le lit de rivière correspondant à la surface du

terrain et plaçons les primitives de rivières afin de créer l'arbre de construction d'écoulement pour animer la surface de l'eau (voir [Figure 75](#)). L'ensemble de ce processus constitue l'amplification procédurale du paysage de rivière.

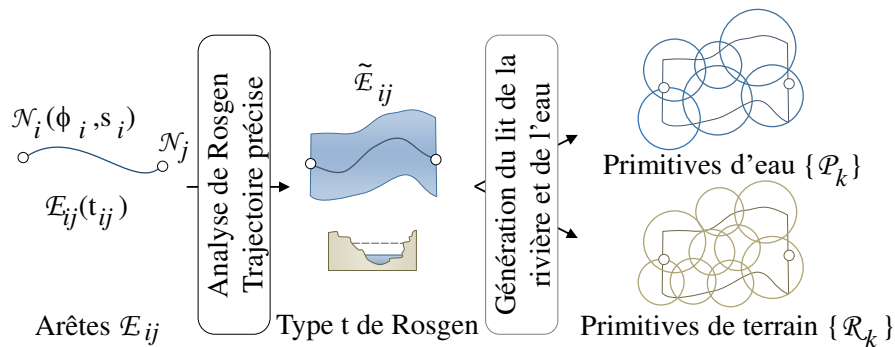


Figure 75 : Notre amplification procédurale prend en compte une trajectoire de rivière peu détaillée $\tilde{\mathcal{E}}$ et la raffine en fonction du type de Rosgen t . Les primitives du lit de rivière \mathcal{R} pour creuser la géométrie et les primitives d'écoulement de la rivière \mathcal{P} pour l'animation de l'eau sont ensuite distribuées sur l'ensemble du domaine de la rivière.

Le graphe de rivières \mathcal{G} est formé de nœuds correspondant aux jonctions de la rivière et d'arêtes \mathcal{E}_{ij} représentant la trajectoire de rivière. Les nœuds du graphe contiennent les données géomorphologiques et en particulier la pente moyenne s_i dans le voisinage local et le débit de la rivière ϕ_i . Les arêtes du graphe, quant à elles, contiennent le type de Rosgen t_{ij} de la section (voir [Figure 72](#)) ainsi que la trajectoire de la rivière sous la forme de courbes cubiques par morceaux.

L'amplification commence par raffiner la trajectoire des arêtes \mathcal{E} du graphe de rivières \mathcal{G} en fonction du type de Rosgen qui définit les propriétés du cours d'eau (voir [sous-section 4.2.3](#)). Le résultat est un graphe géométrique modifié $\tilde{\mathcal{G}} = \{\mathcal{N}, \tilde{\mathcal{E}}\}$. Il est important que ce processus n'agisse pas seulement dans le plan (x, y) mais qu'il modifie aussi le profil longitudinal (élévation z le long du segment de rivière) afin de créer des bassins, des ressauts et des cascades. Ensuite, la géométrie du lit de rivière est construite en sélectionnant et paramétrant un modèle de coupe de section dépendant du type de Rosgen le long de la rivière et en le creusant dans le terrain \mathcal{T} afin d'obtenir un terrain modifié $\tilde{\mathcal{T}}$ ([sous-section 4.2.4](#)). Enfin, une distribution des primitives d'écoulement de rivières ([sous-section 4.2.5](#)) est effectuée puis assemblée dans un arbre de construction d'écoulement qui définit l'animation de la surface de l'eau.

4.2.3 Analyse et ajustement de la trajectoire

Pour chaque segment de rivière \mathcal{E}_i du graphe \mathcal{G} , on génère une nouvelle trajectoire raffinée $\tilde{\mathcal{E}}_i$ suivant les trois dimensions en fonction du type de Rosgen t_i . La trajectoire sur le plan peut comporter des méandres si la pente locale s_i est faible et si le débit ϕ_i est modéré (type de Rosgen C, E ou G). La trajectoire peut également être quasi-rectiligne si la pente est

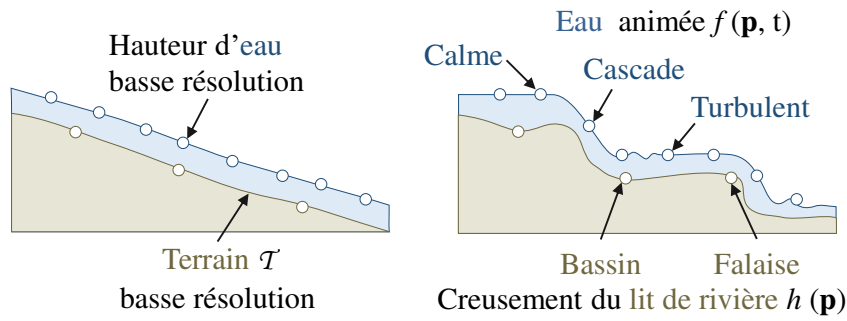


Figure 76 : Le profil longitudinal de la rivière est raffiné par 1) une distribution aléatoire de la trajectoire de la rivière et 2) l'abaissement du niveau d'eau et du lit de rivière entre certains points de distribution en fonction du type de Rosgen et par conséquent les primitives procédurales sont placées selon le profil modifié.

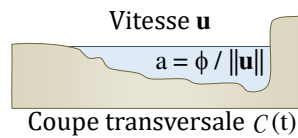


Figure 77 : L'aire mouillée a permet de paramétrer le modèle utilisé afin de garantir la conservation du volume à partir du débit Φ .

importante type de Rosgen **A** ou **A+**). Dans un second temps, le profil d'élévation longitudinale est également raffiné par la création de chutes et de bassins dépendant du type de Rosgen (voir [Figure 76](#) et [Figure 78](#)). Ce dernier point est très important puisque la pente du lit de rivière est un élément déterminant pour le placement des cascades, des vagues et des turbulences.

On note que la hauteur de la rivière décroît de manière monotone. Si cette condition n'est pas vérifiée, on propage la hauteur de la trajectoire de la rivière dans le sens inverse du courant et on effectue des ajustements locaux aux jonctions. Si la pente du lit de la rivière est supérieure à un seuil, on ajuste l'altitude en ajoutant des cascades en nivelant le profil.

Les modèles des coupes transversales par type de Rosgen $C(t)$ sont normés suivant le débit et sont orthogonaux par rapport à la direction de la rivière ([Figure 77](#)). Il est alors nécessaire de calculer l'aire de drainage de la rivière afin de paramétrer le modèle. On a alors pour chaque modèle de coupe transversale $C(t)$ le facteur de grossissement défini par l'aire $a = \phi / \|\mathbf{u}\|$ avec $\phi = 0.42A^{0.69}$ (avec [section 4.3](#)).

4.2.4 Creusement du lit de rivière

À partir de la trajectoire précise de la rivière et de son type de Rosgen, la géométrie du lit de rivière \mathcal{R} peut être construite et ajoutée au terrain ([Figure 79](#)). Le terrain T est donc la première feuille de notre arbre de construction. Pour cela, nous utilisons des modèles de coupe transversale normalisée ainsi que des modèles longitudinaux qui dépendent du type

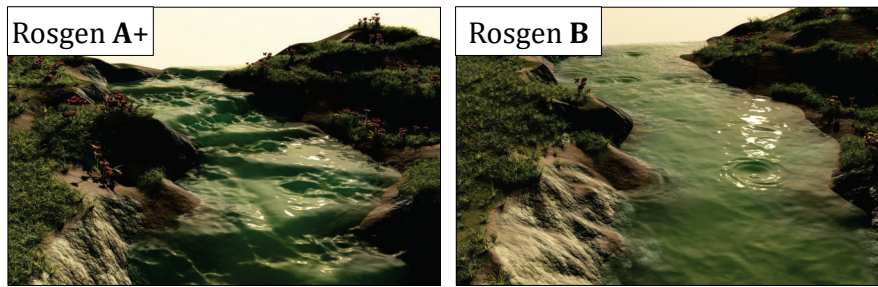


Figure 78 : L'influence de la pente : [Gauche] une rivière pentue ($s = 6\%$) de type de Rosgen A+, qui permet la création de chutes et de bassins avec les cascades et les turbulences correspondantes ; [Droite] une rivière plate ($s = 0.1\%$) avec la même trajectoire sur le plan mais qui produit des primitives d'eau calme avec peu d'ondulations.

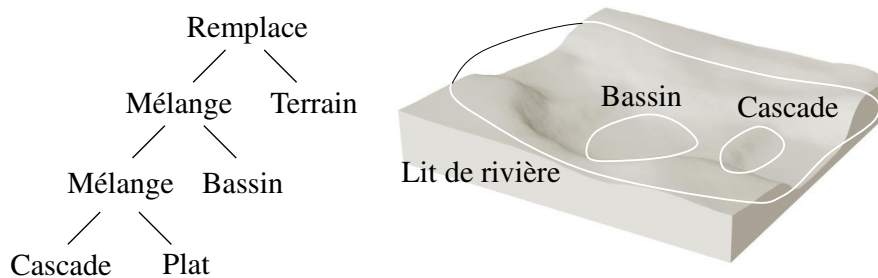


Figure 79 : Représentation de l'arbre de construction du terrain pour le lit de rivière \mathcal{R} avec un type de Rosgen A qui contient une cascade et un bassin.

de Rosgen. Ceux-ci sont inspirés par les coupes transversales $\mathcal{C}(t)$ dans la **Figure 72**, mais aussi par la courbure locale des trajectoires de rivière. Elles sont normalisées puisque leur taille suppose que la surface mouillée (aire de la surface d'eau dans la coupe transversale) soit unitaire et une fois instanciées leur grossissement dépend d'un facteur issu du débit ϕ et de l'altitude de leur trajectoire.

Notre modèle permet donc d'obtenir des profils différents pour chaque type de Rosgen (**Figure 80**).

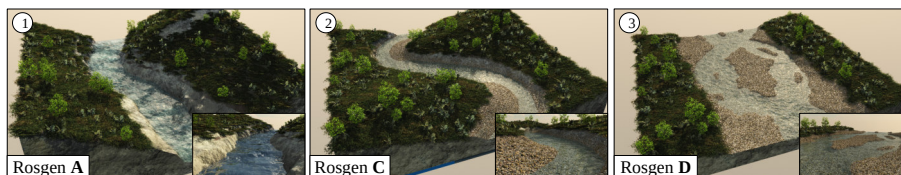


Figure 80 : Différents types de Rosgen : (1) Le type A avec une pente importante, (2) le type C avec beaucoup de courbures, (3) le type D avec plusieurs canaux.

Le modèle de Rosgen est obtenu de la manière suivante : La pente est la caractéristique déterminante d'un **type de Rosgen A** (voir **Figure 81**). Dans notre système, la rivière est définie par une succession de chutes d'eau suivie de zones plates mais avec toujours des turbulences. On place en premier lieu des bassins à des positions aléatoires le long de la trajectoire suivant la pente : plus la pente est importante et plus on place de bassins. Les primitives de lit de rivière de type bassin sont caractérisées par des creux couvrant les zones

de primitives avec des cailloux formant des obstacles aux intersections des bassins pour former des cascades.

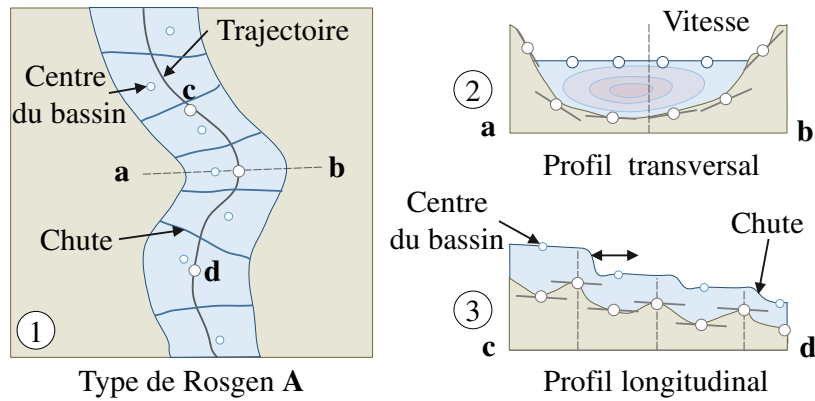


Figure 81 : Génération d'un type de Rosgen A , caractérisé par une pente importante avec des chutes et des bassins. (1) vue sur le plan, (2) coupe transversale, (3) profil longitudinal.

Le **type de Rosgen C** (voir **Figure 82**) est composé d'importantes courbures sur sa trajectoire avec peu de pente (moins de 2%). Sa coupe transversale est asymétrique dans les zones de forte courbure. Une combinaison de profils symétriques et asymétriques est nécessaire. On utilise une interpolation linéaire pour les relier.

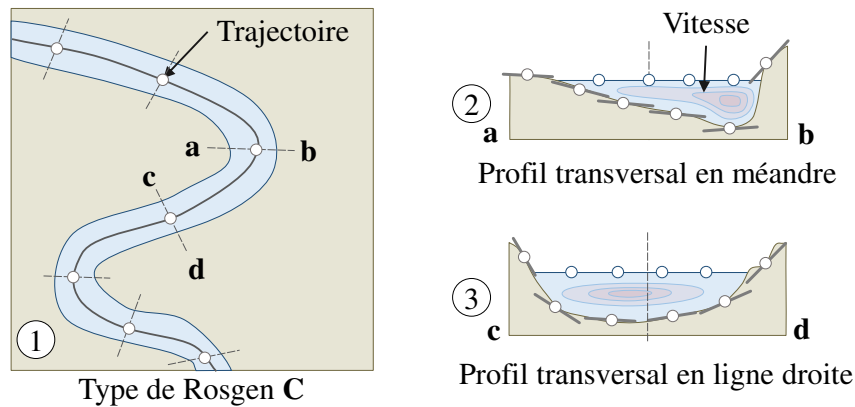


Figure 82 : Génération d'un type de Rosgen C. L'analyse de la courbure sur la trajectoire définit la zone d'affouillement. (1) vue sur le plan, (2), coupe transversale asymétrique pour les fortes courbures, (3) coupe transversale symétrique pour les faibles courbures.

Le **type de Rosgen D** (voir **Figure 83**) caractérise les rivières larges avec peu de pente. Cela conduit à des lits de rivières avec beaucoup de canaux de différentes largeurs et profondeurs. On définit d'abord le nombre de canaux en fonction du débit du flux et de la largeur de la rivière. Chaque canal a un profil symétrique mais suit une trajectoire différente, avec leurs paramètres de profondeur et de largeur définis en divisant le débit de chaque canal. Puisque le nombre de canal peut varier entre les arêtes du graphe de rivières, il est important de lier les canaux correctement. Aussi, afin de préserver le flux, la hauteur finale du lit de rivière est déterminée par la hauteur minimale de l'ensemble des canaux.

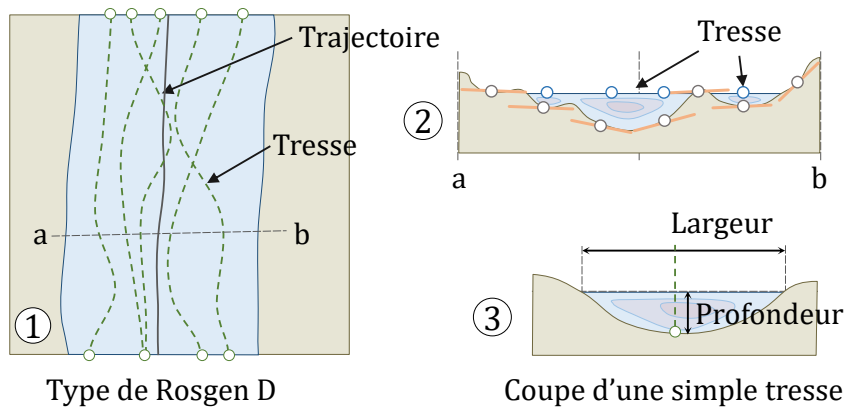


Figure 83 : Génération du type D de Rosgen, avec de nombreux canaux. (1) Vue du plan, (2) coupe transversale totale, (3) coupe transversale d'un simple canal.

Autres types de Rosgen : Les lits de rivières des autres types de Rosgen sont obtenus en modifiant la méthode de génération des types de Rosgen A, C, et D. Par exemple, le type de Rosgen B est une variante du type de Rosgen A avec les bassins davantage séparés à cause de la pente moins importante. Le type de Rosgen DA est similaire d'un type de Rosgen D mais avec une largeur plus importante et donc plus de canaux. Aussi, les type de Rosgen E, F et G sont issus du type C de Rosgen mais avec des paramètres de courbure différents et donc des modèles asymétriques de profil.

Une fois les modèles de Rosgen choisis, ils sont placés le long de la trajectoire de rivière et interpolés. La géométrie finale du lit de la rivière \mathcal{R} est définie comme une fonction d'élévation qui combine les modèles d'instanciation de Rosgen et les caractéristiques de bassins, le domaine du lit de rivière $\Omega_{\mathcal{R}}$ représentant le support compact de cette fonction. Un terrain amplifié $\tilde{\mathcal{T}}$ est obtenu en creusant la géométrie du lit \mathcal{R} sur le terrain original \mathcal{T} . La continuité entre les différentes sections du lit de rivière est garantie grâce à des opérateurs spécifiques de creusement et de combinaison [Gén+15].

4.2.5 Placement des primitives de flux

Les primitives d'eau pour la rivière sont placées sur le domaine du lit de rivière $\Omega_{\mathcal{R}}$ grâce à un processus adaptatif d'échantillonnage. La densité des échantillons dépend de la vitesse du flux, dans les zones de faible courant, les primitives sont moins nombreuses mais plus grandes. Une primitive de flux est placée pour chaque échantillon, son rayon dépend de la densité locale évaluée. On assure ainsi un recouvrement suffisant pour assurer une combinaison continue entre les primitives de l'arbre d'écoulement.

Le type de Rosgen, la trajectoire de la rivière, le profil longitudinal, la surface et la hauteur d'eau ainsi que la topographie du lit de rivière sont utilisés pour définir le type de primitive et ses paramètres (e, a, u) .

Le type de Rosgen influence grandement le choix des primitives d'eau. Par exemple pour le type **A**, pour chaque bassin on définit des hauteurs d'eau presque constantes et là où les bassins se lient, on place des primitives de cascade. Ensuite, on utilise des primitives de turbulences, là où les cascades arrivent, en fonction de la hauteur de la chute et de la vitesse de l'eau. Plus on s'éloigne de la chute, plus l'amplitude et la fréquence diminuent.

Pour un type **C** de Rosgen, lors de fortes courbures, les zones profondes sont plus turbulentes et rapides que les zones peu profondes où l'on place alors des primitives calmes. Dans les zones droites et plus pentues, on imite les rapides en plaçant des primitives de fortes turbulences.

Pour le type **D** de Rosgen, les paramètres de vitesse et de turbulence des primitives d'eau dépendent de la profondeur du canal et de son éloignement au centre du canal.

4.3 Autres applications

Bien que le processus de génération proposé permette d'amplifier automatiquement un terrain défini uniquement par son élévation, nous proposons deux autres applications. La première permet d'amplifier un terrain annoté et est particulièrement conseillée pour visualiser des terrains réels. La seconde utilise une simulation pour créer l'arbre d'écoulement afin d'obtenir une animation amplifiée.

4.3.1 Amplification de terrains annotés

Dans certains cas applicatifs, il est nécessaire d'obtenir une empreinte précise de la rivière sur une carte réelle. Nous supposons alors que l'utilisateur a une carte d'élévation détaillée avec le masque binaire \mathcal{F} de l'occupation de l'eau sur le terrain (voir Figure 84). Ces masques sont souvent obtenus par seuillage d'images de satellites. Nous avons également besoin d'une image avec les courbes discrètes \mathcal{S} représentant la trajectoire de chaque rivière avec la vitesse de l'eau en certains points.

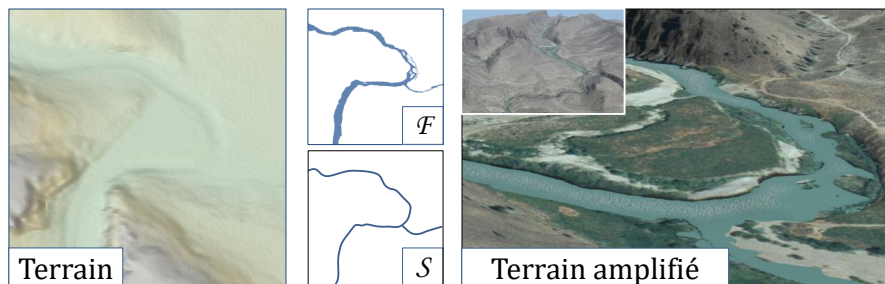


Figure 84 : Paramètres d'entrées de notre terrain détaillé : élévation, courbe de la rivière \mathcal{S} et vitesse et empreinte de la rivière \mathcal{F} . Nous obtenons alors un terrain de 10km^2 rendu sur GPU.

Notre méthode de génération est ajustée pour contraindre le modèle de rivière à s'ajuster aux courbes de trajectoire S et à l'empreinte \mathcal{F} . Cela se produit en plusieurs étapes : tout d'abord, le réseau de la rivière est extrait en projetant la trajectoire sur le terrain et en interpolant les vitesses pour chaque point de la grille. Il est alors possible de corriger la courbe afin de garantir la stricte décroissance de la rivière entre la source et l'embouchure. À partir de la carte d'élévation obtenue et des vitesses, le type de Rosgen de chaque segment de rivière peut être retrouvé et le graphe de rivière construit.

Il est nécessaire de creuser le lit de la rivière, même dans ce cas, à cause des limitations des technologies scanners : la plupart des modèles d'élévation permettent d'obtenir la surface de l'eau et non la base du terrain. La différence ici est que le modèle de la coupe transversale du type de Rosgen est fonction de la distance entre la courbe de trajectoire et les bords de l'empreinte de la rivière. Cela permet d'assurer la largeur du lit de la rivière pour le terrain.

Nous calculons ensuite le débit pour chaque cellule de l'empreinte de la rivière. L'élévation de l'eau w est une simple différence entre le terrain d'entrée et le lit de la rivière creusé. La vitesse quant à elle est évaluée en fonction du point le plus proche de la trajectoire de la rivière : plus la distance au point est importante, plus la vitesse diminue. Nous prenons également en compte la courbure locale de la rivière et la pente du terrain.

Le reste du processus est similaire au modèle précédent avec le placement des primitives et la construction du modèle de rivières.

4.3.2 Animation à partir de simulations

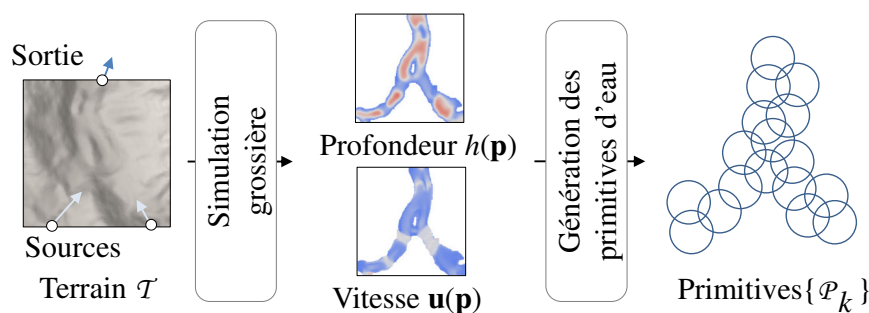


Figure 85 : À partir d'un terrain d'entrée et des conditions aux bords, notre modèle d'amplification procédurale de simulation utilise les équations d'eau en faible profondeur sur une grille grossière. Une fois le presque équilibre atteint, la vitesse \mathbf{u} et la hauteur h d'eau permettent de distribuer les primitives d'écoulement et de les paramétrer.

Bien que l'amplification procédurale de la rivière, définie [section 4.2](#), permette de générer et d'animer une grande variété de rivières, il est possible de créer un arbre d'écoulement à partir d'une simulation. Cela permet d'utiliser une simulation grossière sur un terrain jusqu'à un "presque" équilibre pour obtenir la vitesse et la profondeur de l'eau en chaque point du lit de rivière. Les informations hydrauliques sont alors utilisées pour placer les primitives et créer le

modèle de rivière (Figure 85). Comparé aux autres méthodes présentées, aucune information sur le lit de la rivière ou sur la classification de Rosgen n'est nécessaire. Le placement des primitives et leur paramétrisation ne dépendent que de la simulation et de l'état d'équilibre obtenu.

À partir de l'élévation d'un terrain d'entrée de conditions aux bords, l'animation du fluide est simulée jusqu'à un état de presque équilibre (Figure 86). Bien qu'en théorie toute forme de simulation soit envisageable, nous utilisons la simulation en eau peu profonde [KM90] sans conditions aux bords autres que des sources et des puits sur une grille grossière. Une fois la stabilité obtenue, l'élévation et la vitesse de l'eau sont utilisées pour créer le modèle d'arbre d'écoulement animé. Puisque la simulation est effectuée sur une grille grossière et que notre méthode permet de créer une animation détaillée, nous pouvons parler d'amplification.



Figure 86 : Exemple de la simulation en eau peu profonde sur le terrain initial à différent moment ($n = 60, 150, 500$).

Une telle simulation permet de recréer différentes conditions climatiques comme la sécheresse ou les inondations, simplement en ajustant les volumes d'entrée et de sortie.

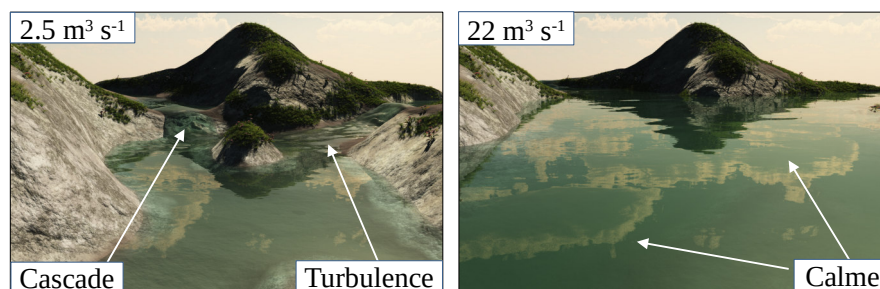


Figure 87 : Amplification procédurale de la simulation pour différents volumes d'eau : (Gauche) une affluence de rivière avec une faible débit ($2.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) provoquant des turbulences dans les pentes. (Droite) surface calme de l'eau pour le même terrain mais avec un débit important ($22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Par exemple, la Figure 87 montre les résultats d'une rivière pour un petit et un grand débit sur un même terrain, avec le type et les paramètres des primitives de rivières s'adaptant automatiquement.

4.4 Résultats

Nous avons proposé une méthode de construction automatique de scènes de rivières à partir de terrains (Figure 88). Le résultat permet un contrôle aux différentes étapes de création. Nous présentons maintenant différents résultats obtenus à partir de celle-ci.

Pour rappel, notre système est implémenté en C++. Les tests ont été effectués sur un ordinateur de bureau équipé d'un processeur Intel® Core i7, cadencé à 4 GHz avec 16Go de RAM et une carte graphique NVidia GTX 970. Les résultats de notre méthode ont été directement rendus dans le logiciel Vue Xstream® qui produit des images photoréalistes.

Les Figure 88 et Figure 89 montrent différents points de vue d'un grand réseau de rivières qui s'étale sur un terrain de 3×3 km. Il est intéressant de préciser quelques chiffres pour la scène considérée : la carte d'élévation en entrée a une résolution de 100 m par pixel, la rivière fait environ 4 km de long et plus de 40,000 primitives forment la surface de la rivière. Le terrain final ainsi que la surface de l'eau ont une résolution de 10 cm.



Figure 88 : À partir d'un terrain nu, notre méthode calcule la pente et l'aire de drainage pour générer automatiquement un graphe de rivières qui est amplifié procéduralement en une rivière détaillée et animée. Dans le cas présent, sur une longueur de 4.266 km, à partir de 63k primitives de terrain et 42k d'eau.

Pour les scènes des Figures 78 et 90, on crée une atmosphère calme avec seulement quelques tourbillons et de petites cascades. On remarque que les rivières plus pentues (Figure 78), avec un type de Rosgen A+, génèrent davantage de primitives que les zones plus plates, de type B, car notre modèle procédural réduit les rayons des primitives d'eau afin de capturer plus précisément la dynamique importante de l'eau.

4.4.1 Statistiques pour une scène

Le Tableau 4.1 montre les paramètres et les statistiques sur les primitives utilisées pour la Figure 80. Le temps de génération pour les deux arbres de construction (lit de rivière et eau) est négligeable pour ces scènes (environ 15ms). Le nombre de primitives dépend de la densité moyenne qui est, pour cet exemple, d'un échantillon tous les 50cm. Il est possible d'optimiser l'arbre de construction en regroupant les primitives de paramètres équivalents dans une seule grande primitive.

Le temps d'évaluation de l'arbre du lit de rivière et de l'eau dépend essentiellement du coût d'évaluation des fonctions de bruit 2D (voir [chapitre 3](#)). Il est possible d'accélérer le traitement en pré-calculant une carte de bruits comme pour l'implémentation GPU.

Scène	Paramètres		Génération			Évaluation	
	L	Type	$\#\mathcal{P}_t$	$\#\mathcal{P}_w$	$t_{\text{gén}}$	$\#\text{Eval}$	$t_{\text{géom}}$
Fig. 80	63	A	411	520	12	2×512^2	617
Fig. 80	76	C	646	754	13	2×512^2	583
Fig. 80	60	D	1189	1270	38	2×1024^2	3480

Table 4.1 : Statistiques pour différents types de rivières très détaillées : Longueur de la rivière [m], Type de Rosgen, nombre de primitives procédurales (terrain $\#\mathcal{P}_t$ et eau $\#\mathcal{P}_w$), temps de génération procédurale du modèle de rivière $t_{\text{gén}}$ [ms], nombre de fonctions évaluées $\#\text{Eval}$ et temps d'évaluation $t_{\text{géom}}$ du lit de rivière et de la surface de l'eau sur CPU.



Figure 89 : Le paysage procédural généré inclut une rivière de ≈ 4 km de long dans une vallée désertique. Le modèle de la rivière prend 18 secondes à générer et contient 40 000 primitives.

Pour résumer, nous avons proposé une méthode efficace de génération et d'édition d'une rivière animée de grande taille avec un niveau de détail important. La [Figure 88](#) par exemple montre une rivière générée procéduralement de 4.266 km de long en paramétrant 42 584 primitives d'écoulement. La surface de la rivière est rendue à une résolution de 1cm avec un taux de rafraîchissement de 50 - 200Hz sur une carte graphique NVidia 970.

Une approche par génération procédurale inverse permet d'utiliser notre modèle avec les caractéristiques issues d'une simulation en eau peu profonde. Même si notre méthode permet d'effectuer des rendus réalistes qui pourraient être utilisés pour des films présentant de très grandes scènes et ayant un budget restreint, notre méthode est pensée pour les applications en temps réel telles que les jeux vidéo (dont les mondes auto-générés), les environnements virtuels et la visualisation de données géographiques (telle que Géoportail).

4.4.2 Performances

Notre implémentation permet aussi bien un rendu temps réel sur GPU qu'un rendu de grande qualité, hors-ligne, photoréaliste. Le modèle final a un faible coût mémoire : il est possible de représenter des rivières, avec des méandres, de plusieurs kilomètres de long et une animation complexe de l'eau avec seulement quelques mégaoctets. La consommation mémoire n'est que de 22 kilooctets pour une petite rivière de 50 m et jusqu'à 2.7 mégaoctets pour une grande rivière de ≈ 4 km. Même sans optimisation, chaque primitive individuelle ne prend qu'entre 50 à 90 octets.

Scène	Caractéristiques			Génération			Rendu temps réel	
	Taille	L	Type	$\#P_t$	$\#P_w$	t_{gen}	$\#Eval$	Fréq.
Aride (88)	3×3	4.3	B, A	63k	42k	130	3.1–9.1	160–500
Nevada (64)	6×6	13.8	B, D, DA	412k	276k	175	8.3–15.1	48–195
Network	24×24	193.1	A, A+, B, C, D	930k	1505k	227	5.5–13.0	45–234

Table 4.2 : Statistiques pour une génération de rivières très détaillées : taille du terrain [km^2], longueur de la rivière [km], type de Rosgen, nombre de primitives procédurales (terrain $\#P_t$ et eau $\#P_w$), temps de génération procédurale du modèle de rivière t_{gen} [s], nombre de fonctions évaluées $\#Eval$ (triangulation à la volée) et fréquence d'image pour le rendu du terrain et de la surface de l'eau sur GPU [image/s].

4.4.3 Contrôle

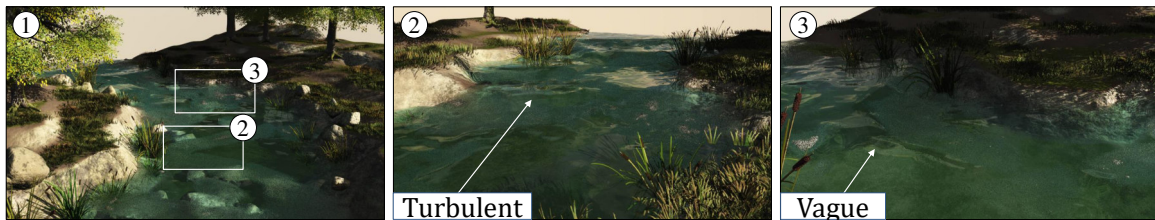


Figure 90 : Exemple de rivière générée procéduralement par notre système. L'utilisateur définit le type de Rosgen, la trajectoire ainsi que les débits en amont et en aval. Le lit de rivière et les différentes primitives d'eau (vortex, turbulences et calme) ont été générées automatiquement en fonction de leurs positions et en accord avec les berges et les roches situées dans le lit de la rivière.

Notre méthode permet de créer de manière complètement autonome les trajectoires des rivières puis de placer des primitives procédurales dans l'arbre de construction d'écoulement. Cependant l'utilisateur peut intervenir directement s'il souhaite guider la création de la scène. Il peut intervenir durant plusieurs étapes du processus en fonction du niveau de contrôle qu'il souhaite : a) en modifiant individuellement le type et les paramètres des primitives d'écoulement, b) en éditant l'arbre de construction en ajoutant, supprimant ou remplaçant des nœuds ou sous arbres, c) en modifiant les entrées telles que l'empreinte au sol de la rivière ou encore les données de débit.

Les Figures 90 et 91 ont été retravaillées pour améliorer leur aspect visuel et proposent un exemple de l'impact de l'édition sur une scène. Figure 90 a été créée pour tester l'efficacité du contrôle en utilisant une approche par primitives. Pour obtenir cet effet, certaines primitives ont été remplacées en turbulence et en vortex et leurs paramètres ont été ajustés, cela nous a pris ≈ 10 minutes au total. Figure 91 montre l'effet important de l'opérateur de remplacement pour améliorer la scène, avec l'utilisateur plaçant des tourbillons dans le sillage de l'arbre et du rocher.

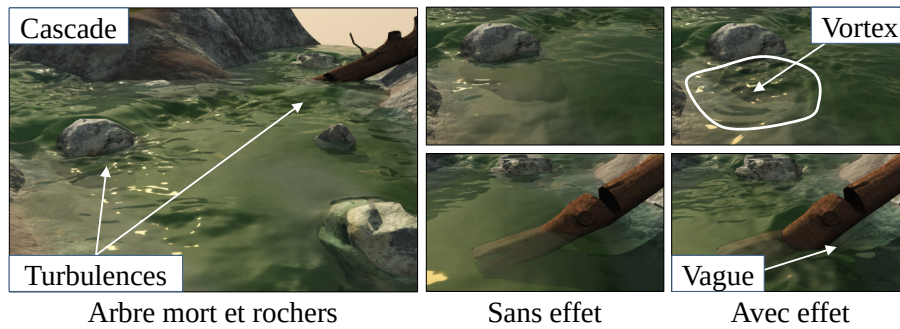


Figure 91 : Les tourbillons à la suite des rochers et de l'arbre mort ont été créés en ajoutant des primitives turbulences et vortex. Ces effets ont été spécifiés et ajoutés grâce à des opérateurs de remplacement pour annuler l'animation préalable de la rivière.

4.4.4 Comparaison avec l'état de l'art

À la vue des détails techniques expliqués jusqu'à présent, il est utile de rappeler les techniques les plus proches et de proposer une comparaison détaillée. Ce type de comparaison doit nécessairement se concentrer sur l'animation de l'eau puisque aucun système existant ne propose une création concomitante du lit de rivière et de l'animation de l'eau.

Bien que les simulations les plus rapides de l'eau [JW17 ; Jes+18] puissent remplacer la partie d'animation des rivières de notre modèle, cela négligerait le lien entre la génération du lit de rivière et l'animation de la surface de l'eau et les avantages de création que celui-ci apporte.

On peut également comparer à Yu *et al.* [Yu+09] qui définissent leur modèle d'animation d'eau procédurale comme une fonction lisse dépendant de la distance à la berge la plus proche. Nos primitives, en contraste, ne sont pas limitées à un placement ou une paramétrisation et permettent un plus grand réalisme et davantage de contrôle. En particulier, le nombre de phénomènes réalisables par notre méthode se compare bien à la simulation vectorielle de caractéristiques de vague d'eau décrit par Yu *et al.* [YNS11]. Génévaux *et al.* [Gén+13] présentent un processus de génération de terrain grande échelle basé sur l'hydrologie. Bien que cette méthode puisse être utilisée dans notre méthode en remplaçant la génération du réseau de rivières et le raffinement de la trajectoire, qui permettrait de creuser directement le lit de rivière précis et de placer les primitives d'eau, la méthode ne permet pas de modifier un modèle numérique de terrain existant et ne permet pas d'animer les caractéristiques d'écoulement.

4.4.5 Limitations

Notre méthode a cependant certaines restrictions. Dans cette thèse, nous nous appuyons sur un ensemble de sept types de primitives d'écoulement, qui, bien que capable de représenter un grand nombre d'effet comme les ondulations, les vagues et les siphons, ne peut pas résumer

l'ensemble possible des phénomènes. Heureusement, notre méthode est extensible et de nouvelles primitives d'écoulement ainsi que de nouveaux opérateurs d'assemblage peuvent facilement être développés.

Aussi, même si les opérateurs de mélange et de remplacement ne sont pas physiquement réalistes, ils permettent cependant d'obtenir des résultats visuellement convaincants.

Des effets non réalistes peuvent apparaître (en mélangeant deux primitives avec des vitesses opposées par exemple) mais le placement correct des primitives ([section 4.2](#)) empêche ces artefacts et produit des animations convaincantes en pratique.

La limitation la plus importante de notre modèle concerne les effets 3D des fluides, tels que les vagues déferlantes, les chutes d'eau ou encore les éclaboussures car la surface de l'eau est définie comme une fonction d'élévation animée. Généraliser notre arbre de construction avec des primitives d'écoulement 3D est un axe prometteur pour nos futures recherches.

Actuellement, nous acceptons l'assemblage de caractéristiques de rivières disparates en minimisant le recouvrement entre de telles primitives et en utilisant uniquement l'opérateur de mélange sur les bords. Une autre possibilité à explorer dans le futur serait de définir des fonctions d'assemblage plus sophistiquées. Cependant, cette sophistication pourrait probablement nuire à la performance de calcul qui est l'un des atouts importants de notre méthode. Un autre axe serait d'améliorer les caractéristiques et le réalisme de nos primitives tout en préservant l'architecture pour une utilisation rapide. Cela viendrait encore impacter l'interactivité.

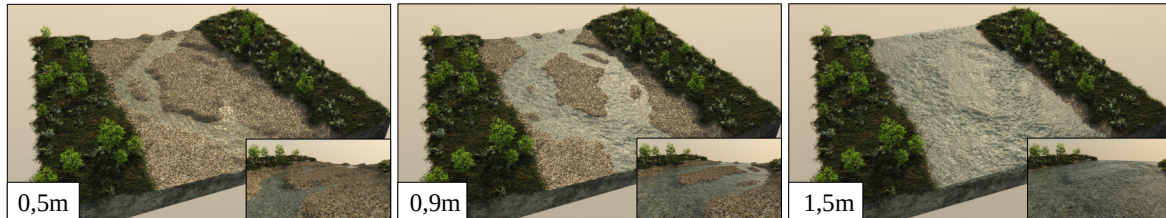


Figure 92 : Type de Rosgen **D** pour différents niveaux d'eau : 0.5 m, 0.9 m et 1.5 m

Enfin, nous avons déjà commencé à réfléchir à une implémentation multi-matériaux pour la création de nos modèles de Rosgen : pour la formation du lit de rivière (voir les couches de roches dans la [Figure 80](#)) et pour le niveau de l'eau (voir les différentes hauteurs dans la [Figure 92](#)). Ceci n'est pas encore complètement implémenté dans notre méthode et nous laissons l'usage des couches de matériaux (tels que la couche rocheuse, les cailloux et le sable) à des travaux futurs.

CONCLUSION

La génération de terrains réalistes est un problème difficile en informatique graphique. La complexité des reliefs et les spécificités des caractéristiques aux différentes résolutions rendent ce travail laborieux. Les principaux enjeux de la création et de la modélisation sont : le contrôle donné à l'artiste, le réalisme de la scène et les performances du modèle. Dans le cadre de cette thèse, les notions de contrôle et d'échelle ont été privilégiées.

Contributions

Nous avons travaillé sur la création de scènes de grandes tailles, structurées par leur réseau hydrographique. La modélisation des rivières est une problématique complexe à plusieurs échelles. À l'échelle régionale (kilométrique), la trajectoire de la rivière, et plus généralement le graphe hydraulique, doit structurer le terrain. Au niveau local (hectométrique), les profils des rivières doivent être cohérents avec les connaissances de géomorphologie et apporter de la variété. Enfin à l'échelle des détails (centimétrique), les lits des rivières et l'animation de l'eau doivent être suffisamment précis pour apporter des effets caractéristiques de ces milieux. Ces éléments contribuent grandement au réalisme à la scène.

Nous avons proposé un modèle de rivière, s'appuyant sur un arbre de construction de terrain et d'écoulement, qui unifie la géométrie du terrain et l'animation de l'eau pour des scènes de quelques kilomètres, comportant des détails à des résolutions de 10 cm. Ce modèle est accompagné d'une méthode de génération automatique et interactive à partir d'un terrain initial d'élévation. Bien que l'intervention de l'artiste ne soit pas nécessaire, il est possible de guider la création à de nombreuses étapes de la méthode. La structure de notre modèle de rivière a été pensée pour une implémentation GPU et permet un rendu interactif à 70Hz ou plus, et ce même pour des scènes comprenant des dizaines de milliers de primitive d'eau. Le modèle permet également de générer un maillage afin d'utiliser un moteur de rendu photoréaliste.

Les paysages naturels de plusieurs kilomètres ont un grand nombre d'applications en informatique graphique. Les méthodes de générations proposées conviennent aussi bien à la création de scènes avec un contrôle artistique important (incluant les mondes auto-générés) qu'à l'amplification de données réelles. Elles conviennent donc aussi bien à la création vidéoludique qu'à la visualisation d'informations géographiques. Notre modèle de rivière est

cependant pensé pour les applications temps réel, telles que les jeux vidéo et la visualisation de données cartographiques.

À grande échelle (500m - 50km), nous avons proposé une méthode de génération du graphe hydraulique à partir de différents travaux existants dans des disciplines spécialisées. Le réseau obtenu est facilement éditable et garantit un écoulement réaliste. Cependant, cette méthode suppose un terrain existant comportant un réseau de drainage et n'est pas applicable à des terrains générés sans cette garantie.

Au niveau local (5m - 500m), la méthode de génération utilise les informations du graphe hydraulique pour ajuster la trajectoire, creuser le lit de la rivière et placer les primitives de flux en fonction de profils prédéfinis. Cette création concomitante du lit de la rivière et de l'animation de l'eau permet la cohérence de l'animation mais surtout une génération rapide avec un processus de création interactif. L'utilisation de profil type peut cependant être limitant car il est nécessaire de prévoir l'ensemble des profils possibles. De plus, leur mise à l'échelle peut créer des artefacts et des motifs de répétitions peuvent apparaître.

Enfin, à l'échelle des détails (<5m), le modèle de rivière permet de créer des caractéristiques sur des domaines restreints. Il est donc possible d'avoir des détails cohérents sur l'ensemble de la rivière. L'édition est facile et interactive et la visualisation est temps réel, même pour de très grands réseaux. La méthode de placement automatique des primitives permet une animation visuellement plausible mais pas strictement physique.

Perspectives

Nous n'avons exploré qu'une partie des caractéristiques des scènes naturelles de rivières. Notre modèle de génération et d'animation de cours d'eau pourrait être étendu selon deux axes.

Modèle volumique Notre modèle de rivière creuse le terrain et modélise la surface de l'eau. Ajouter de l'information volumique permettrait d'augmenter le réalisme de la scène. La création du lit de la rivière avec plusieurs matériaux ajouterait beaucoup de détails à la scène. Cela permettrait notamment d'ajouter des bancs de sable à l'intérieur des méandres, de modifier la végétation dans le lit moyen (qui, sous l'effet des fréquentes crues, est plus jeune que sur le reste du terrain), mais cela permettrait également de mieux définir l'animation de l'eau qui, pour rappel, dépend du coefficient de Strickler et donc des matériaux. L'aspect volumique peut également se retrouver dans la modélisation de l'eau par l'ajout des vagues déferlantes.

Lacs et cascades Malgré les travaux d'édition interactive de scène de cascade [Emi+15], aucune méthode en infographie ne permet de modéliser les lacs d'altitude et les cascades. Les problématiques de placement et de génération des lacs de montagnes sont complexes car elles sont inhérentes aux problématiques de création des glaciers dont ils découlent. Ces éléments n'ont pas été traités dans la littérature. L'animation de l'eau des lacs au contraire semble proche des travaux d'animation de l'eau près des côtes. Il est néanmoins intéressant de noter que certains mécanismes diffèrent. Par exemple, les vagues stationnaires (seiches), typiques des bassins clos, ne peuvent pas être représentées de la même manière que les vagues progressives présentes dans les océans. À l'inverse, le placement des cascades a été étudié, cependant la géométrie est difficile à modéliser. Au niveau du terrain, l'action violente de l'eau génère de l'érosion volumique avec des caractéristiques complexes. Enfin, les modèles d'animation de l'eau sont souvent surfacique alors qu'il s'agit d'un phénomène où la représentation volumique semble essentielle. Ajouter ces éléments scéniques à notre modèle permettrait une utilisation unifiée pour l'ensemble des éléments d'eau des terrains montagneux.

BIBLIOGRAPHIE

- [ASA07] Nguyen Hoang ANH, Alexei SOURIN et Parimal ASWANI. “Physically Based Hydraulic Erosion Simulation on GPU”. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*. Perth, Australia : ACM, 2007, p. 257-264 (cf. p. 17).
- [Arg+17] Oscar ARGUDO, Carlos ANDUJAR, Antonio CHICA, Eric GUÉRIN, Julie DIGNE, Adrien PEYTAVIE et Eric GALIN. “Coherent multi-layer landscape synthesis”. In : *The Visual Computer* 33.6 (2017), p. 1005-1015 (cf. p. 22, 25).
- [AM15] Maryam ARIYAN et David MOULD. “Terrain synthesis using curve networks”. In : *Proceedings of Graphics Interface*. 2015, p. 9-16 (cf. p. 29).
- [BD06] Lionel BABOUD et Xavier DÉCORET. “Realistic Water Volumes in Real-Time”. In : *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. Eurographics. Vienne, Austria, 2006 (cf. p. 44).
- [BLM14] Richard BARNES, Clarence LEHMAN et David MULLA. “Priority-flood : An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models”. In : *Computers & Geosciences* 62 (2014), p. 117 -127 (cf. p. 85).
- [Bar84] Alan H. BARR. “Global and Local Deformations of Solid Primitives”. In : *Proceedings of the 11th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH ’84. New York, NY, USA : ACM, 1984, p. 21-30 (cf. p. 61).
- [Bec+18] M. BECHER, M. KRONE, G. REINA et T. ERTL. “Feature-based Volumetric Terrain Generation and Decoration”. In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2018), p. 1-1 (cf. p. 5, 32, 33).
- [Bec+17] Michael BECHER, Michael KRONE, Guido REINA et Thomas ERTL. “Feature-based Volumetric Terrain Generation”. In : *Proceedings of the 21st ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. 2017, 10 :1-10 :9 (cf. p. 32, 33).
- [Bel07] Farès BELHADJ. “Terrain modeling : a constrained fractal model”. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*. Grahamstown, South Africa : ACM, 2007, p. 197-204 (cf. p. 34, 38).
- [BA05a] Farès BELHADJ et Pierre AUDIBERT. “Modeling Landscapes with Ridges and Rivers”. In : *Proceedings of the Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Monterey, USA : ACM, 2005, p. 151-154 (cf. p. 38, 39).
- [Ben07] Bedrich BENES. “Real-Time Erosion Using Shallow Water Simulation”. In : *Proceedings of Virtual Reality Interactions and Physical Simulations*. Dublin, Ireland : Eurographics Association, 2007 (cf. p. 18, 39).
- [BA05b] Bedrich BENES et Xabier ARRIAGA. “Table mountains by virtual erosion”. In : *Proceedings of the Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. Eurographics Association, 2005, p. 33-39 (cf. p. 14).

- [BF01a] Bedrich BENES et Rafael FORSBACH. "Layered Data Representation for Visual Simulation of Terrain Erosion". In : *Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics*. T. 25(4). IEEE Computer Society, 2001, p. 80-86 (cf. p. 10, 39).
- [BF01b] Bedrich BENES et Rafael FORSBACH. "Parallel implementation of terrain erosion applied to the surface of mars". In : *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*. Camps Bay, South Africa : ACM, 2001, p. 53-57 (cf. p. 39).
- [BF02] Bedrich BENES et Rafael FORSBACH. "Visual simulation of hydraulic erosion". In : *Journal of WSCG* 10.1-3 (2002), p. 79-86 (cf. p. 17, 34, 39).
- [Ben+06] Bedrich BENES, Václav TĚŠÍNSKÝ, Jan HORNYŠ et Sanjiv K. BHATIA. "Hydraulic erosion". In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 17.2 (2006), p. 99-108 (cf. p. 17, 39).
- [Bes+09] Lance E. BESAW, Donna M. RIZZO, Michael KLINE, Kristen L. UNDERWOOD, Jeffrey J. DORIS, Leslie A. MORRISSEY et Keith PELLETIER. "Stream classification using hierarchical artificial neural networks : A fluvial hazard management tool". In : *Journal of Hydrology* 373.1 (2009), p. 34 -43 (cf. p. 88).
- [BK79] K. J. BEVEN et M. J. KIRKBY. "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant". In : *Hydrological Sciences Bulletin* 24.1 (1979), p. 43-69. eprint : <https://doi.org/10.1080/02626667909491834> (cf. p. 83).
- [BW83] Keith BEVEN et Eric F. WOOD. "Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas". In : *Journal of Hydrology* 65.1-3 (1983), p. 139-158 (cf. p. 82).
- [BW06] Martin BOKELOH et Michael WAND. "Hardware Accelerated Multi-Resolution Geometry Synthesis". In : *Proc. Symp. Interactive 3D Graphics and Games*. 2006 (cf. p. 27).
- [Bra19] Jean BRAUN. "Modelling landscape evolution : from simulation to inspiration". In : *Arthur Holmes Medal Lecture*. General Assembly of the European Geosciences Union (EGU), 2019 (cf. p. 13).
- [BS97] Jean BRAUN et Malcolm SAMBRIDGE. "Modelling landscape evolution on geological time scales : a new method based on irregular spatial discretization". In : *Basin Research* 9.1 (1997), p. 27-52 (cf. p. 13, 16).
- [Bri08] Robert BRIDSON. *Fluid Simulation*. Natick, MA, USA : A. K. Peters, Ltd., 2008 (cf. p. 16).
- [Bri15] Robert BRIDSON. *Fluid simulation for computer graphics*. CRC Press, 2015 (cf. p. 42).
- [BHN07] Robert BRIDSON, Jim HOURIHAM et Marcus NORDENSTAM. "Curl-noise for Procedural Fluid Flow". In : *ACM Trans. Graph.* 26.3 (juil. 2007) (cf. p. 46).
- [BSS07] John BROSZ, Faramarz F. SAMAVATI et Mario Costa SOUSA. "Terrain Synthesis By-Example". In : *Advances in Computer Graphics and Computer Vision* 4 (2007), p. 58-77 (cf. p. 21).
- [BN08] Eric BRUNETON et Fabrice NEYRET. "Real-time rendering and editing of vector-based terrains". In : *Computer Graphics Forum*. Special Issue : Eurographics '08 27.2 (avr. 2008), p. 311-320 (cf. p. 34, 40).
- [BAB09] Tim BURRELL, Dirk ARNOLD et Stephen BROOKS. "Advectioned river textures". In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 20.2-3 (2009), p. 163-173 (cf. p. 44).
- [BM99] Peter A. BURROUGH et Rachael A. MCDONNELL. *Principles of Geographical Information Systems*. 1999 (cf. p. 79).

- [Car98] Michel CARLIER. *Hydraulique générale et appliquée*. Paris : Eyrolles, 1998 (cf. p. 87).
- [Car80] Loren C. CARPENTER. “Computer Rendering of Fractal Curves and Surfaces”. In : *SIGGRAPH Comput. Graph.* 14.SI (juil. 1980), p. 9-9 (cf. p. 6).
- [CB09] Giliam J. P. de CARPENTIER et Rafael BIDARRA. “Interactive GPU-based Procedural Heightfield Brushes”. In : *Proceedings of the International Conference on Foundations of Digital Games*. Orlando, USA : ACM, 2009, p. 55-62 (cf. p. 27).
- [Che+97] J. X. CHEN, N. d. V. LOBO, C. E. HUGHES et J. M. MOSHELL. “Real-time fluid simulation in a dynamic virtual environment”. In : *IEEE Computer Graphics and Applications* 17.3 (1997), p. 52-61 (cf. p. 43).
- [CL95] Jim X. CHEN et Niels da Vitoria LOBO. “Toward Interactive-rate Simulation of Fluids with Moving Obstacles Using Navier-Stokes Equations”. In : *Graph. Models Image Process.* 57.2 (mar. 1995), p. 107-116 (cf. p. 43).
- [Che04] Stephen CHENNEY. “Flow Tiles”. In : *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. SCA '04. Grenoble, France : Eurographics Association, 2004, p. 233-242 (cf. p. 46).
- [CM10] Nuttapon CHENTANEZ et Matthias MÜLLER. “Real-time Simulation of Large Bodies of Water with Small Scale Details”. In : *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. SCA '10. 2010, p. 197-206 (cf. p. 44).
- [Chi+97] Norishige CHIBA, Kazunobu MURAOKA, Akio DOI et Junya HOSOKAWA. “Rendering of Forest Scenery Using 3D Textures”. In : *Journal of Visualization and Computer Animation* (1997) (cf. p. 6).
- [CMF98] Norishige CHIBA, Kazunobu MURAOKA et K. FUJITA. “An erosion model based on velocity fields for the visual simulation of mountain scenery”. In : *The Journal of Visualization and Computer Animation* 9.4 (1998), p. 185-194 (cf. p. 19, 39).
- [CF88] Peter CONSTANTIN et Ciprian FOIAS. *Navier-stokes equations*. University of Chicago Press, 1988 (cf. p. 16).
- [Cor+16] Guillaume CORDONNIER, Jean BRAUN, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES, Eric GALIN, Adrien PEYTAVIE et Eric GUÉRIN. “Large scale terrain generation from tectonic uplift and fluvial erosion”. In : *Computer Graphics Forum* 35.2 (2016), p. 165-175 (cf. p. 15, 20, 21).
- [Cor+18] Guillaume CORDONNIER, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES, Jean BRAUN et Eric GALIN. “Sculpting Mountains : Interactive Terrain Modeling Based on Subsurface Geology”. In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24.5 (2018), p. 1756-1769 (cf. p. 21).
- [Cor+17] Guillaume CORDONNIER, Eric GALIN, James GAIN, Bedrich BENES, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAVIE et Marie-Paule CANI. “Authoring Landscapes by Combining Ecosystem and Terrain Erosion Simulation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 36.4 (2017), 134 :1-134 :12 (cf. p. 10, 18).
- [CCB94] Mariza C. COSTA-CABRAL et Stephen J. BURGESS. “Digital Elevation Model Networks (DEMON) : A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas”. In : *Water Resources Research* 30.6 (1994), p. 1681-1692 (cf. p. 86).
- [DMS05] Carsten DACHSBACHER, Martin MEYER et Marc STAMMINGER. “Heightfield Synthesis by Non-Parametric Sampling”. In : *Proceedings of Vision Modeling and Visualization*. Erlangen, Germany, 2005, p. 297-302 (cf. p. 23).

- [Dar+11] Emmanuelle DARLES, Benoît CRESPIN, Djamchid GHAZANFARPOUR et Jean-Christophe GONZATO. "A Survey of Ocean Simulation and Rendering Techniques in Computer Graphics". In : *Computer Graphics Forum* 30.1 (2011), p. 43-60 (cf. p. 42).
- [DC+14] Daniel Michelon DE CARLI, Cesar Tadeu POZZER, Victor SCHETINGER et Fernando BEVILACQUA. "Procedural generation of 3D canyons". In : *Proceedings of the Conference on Graphics, Patterns and Images*. Rio de Janeiro, Brazil : IEEE, 2014, p. 103-110 (cf. p. 30, 38).
- [Der+11] Evgenij DERZAPF, Björn GANSTER, Michael GUTHE et Reinhard KLEIN. "River Networks for Instant Procedural Planets". In : *Computer Graphics Forum* 30.7 (2011), p. 2031-2040 (cf. p. 34, 36).
- [DKW94] A. R. DIXON, G. H. KIRBY et D. P. M. WILLS. "A Data Structure for Artificial Terrain Generation". In : *Computer Graphics Forum* 13.1 (1994), p. 37-48 (cf. p. 27).
- [DN01] Cedric DODARD et Fabrice NEYRET. "Simulation d'un ruisseau par approches phenomenologiques pour la synthese d'images". Mém. de mast. ENSIMAG-iMAGIS/GRAVIR, 2001 (cf. p. 87).
- [DH98] Matthew DUNN et Robert HICKEY. "The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS". In : *Cartography* 27.1 (1998), p. 9-15 (cf. p. 79, 80).
- [Dun78] Thomas DUNNE. "Field studies of hillslope flow processes." In : *Hillslope hydrology*. (1978), p. 389-227 (cf. p. 83).
- [DB70] Thomas DUNNE et Richard D. BLACK. "Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed". In : *Water Resources Research* 6.5 (1970), p. 1296-1311 (cf. p. 81).
- [Ebe+02] David EBERT, Kenton MUSGRAVE, Darwyn PEACHEY, Ken PERLIN et Steven WORLEY. *Texturing and Modeling : A Procedural Approach*. 3rd. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2002 (cf. p. 25, 26, 28, 54).
- [EF01] Alexei A. EFROS et William T. FREEMAN. "Image quilting for texture synthesis and transfer". In : *Proceedings of SIGGRAPH Conference – SIGGRAPH*. Los Angeles, USA : ACM, 2001, p. 341-346 (cf. p. 21).
- [EL99] Alexei A. EFROS et Thomas K. LEUNG. "Texture Synthesis by Non-parametric Sampling". In : *IEEE International Conference on Computer Vision*. Corfu, Greece : IEEE, 1999, p. 1-6 (cf. p. 23).
- [Emi+15] Arnaud EMILIEN, Pierre POULIN, Marie-Paule CANI et Ulysse VIMONT. "Interactive Procedural Modelling of Coherent Waterfall Scenes". In : *Computer Graphics Forum* 34.6 (2015), p. 22-35 (cf. p. 41, 46, 47, 107).
- [EMF02] Douglas ENRIGHT, Stephen MARSCHNER et Ronald FEDKIW. "Animation and Rendering of Complex Water Surfaces". In : *ACM Transactions on Graphics* 21.3 (2002), p. 736-744 (cf. p. 43).
- [Ers+06] Robert H. ERSKINE, Timothy R. GREEN, Jorge A. RAMIREZ et Lee H. MACDONALD. "Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area". In : *Water Resources Research* 42.9 (2006) (cf. p. 86).
- [Far+07] Tom G. FARR, Paul A. ROSEN, Edward CARO, Robert CRIPPEN, Riley DUREN, Scott HENSLEY, Michael KOBRICK, Mimi PALLER et al. "The Shuttle Radar Topography Mission". In : *Reviews of Geophysics* 45.2 (2007) (cf. p. 22).

- [FF01] Nick FOSTER et Ronald FEDKIW. “Practical Animation of Liquids”. In : *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '01. ACM, 2001, p. 23-30 (cf. p. 43).
- [FM96] Nick FOSTER et Dimitri METAXAS. “Realistic Animation of Liquids”. In : *Graphical Models and Image Processing* 58.5 (1996), p. 471 -483 (cf. p. 43).
- [FFC82a] Alain FOURNIER, Don FUSSELL et Loren CARPENTER. “Comment on Computer rendering of stochastic models”. In : *Communications of the ACM* 25.8 (1982), p. 581-584 (cf. p. 27).
- [FFC82b] Alain FOURNIER, Don FUSSELL et Loren CARPENTER. “Computer rendering of stochastic models”. In : *Computer Graphics* 25.6 (1982), p. 371-384 (cf. p. 26, 27, 29, 35).
- [FR86] Alain FOURNIER et William T. REEVES. “A Simple Model of Ocean Waves”. In : *SIGGRAPH Comput. Graph.* 20.4 (août 1986), p. 75-84 (cf. p. 45).
- [Fre91] Graham FREEMAN. “Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid.” In : *Computer and Geoscience* 17.3 (1991), p. 413-422 (cf. p. 83, 85, 90).
- [GMM15] James GAIN, Bruce MERRY et Patrick MARAIS. “Parallel, Realistic and Controllable Terrain Synthesis”. In : *Computer Graphics Forum* 34.2 (2015), p. 105-116 (cf. p. 22, 23).
- [GMS09] James E. GAIN, Patrick MARAIS et Wolfgang STRASSER. “Terrain sketching”. In : *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. Boston, USA : ACM, 2009, p. 31-38 (cf. p. 29, 38).
- [Gal+19] Eric GALIN, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAUVIE, Guillaume CORDONNIER, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES et James GAIN. “A Review of Digital Terrain Modeling”. In : *Computer Graphics Forum (proceedings of Eurographics 2019 STAR)* 38.2 (2019), p. 553-577 (cf. p. 6-9, 13, 14, 16, 17, 22-24, 27, 28).
- [Gal+11] Éric GALIN, Adrien PEYTAUVIE, Éric GUÉRIN et Bedrich BENES. “Authoring Hierarchical Road Networks”. In : *Computer Graphics Forum* 30.7 (2011), p. 2021-2030 (cf. p. 86).
- [Gal+10] Éric GALIN, Adrien PEYTAUVIE, Éric GUÉRIN et Nicolas MARÉCHAL. “Procedural Generation of Roads”. In : *Computer Graphics Forum* 29.2 (2010), p. 429-438 (cf. p. 86).
- [GM01] Manuel N. GAMITO et Kenton Forest MUSGRAVE. “Procedural landscapes with overhangs”. In : *Proceedings of the Portuguese Computer Graphics Meeting*. Lisbon, Portugal, 2001 (cf. p. 9, 32).
- [Gén15] Jean-David GÉNEVAUX. “Représentation, modélisation et génération procédurale de terrains”. In : (2015) (cf. p. 1, 6, 7, 52, 53, 88).
- [Gén+13] Jean-David GÉNEVAUX, Éric GALIN, Éric GUÉRIN, Adrien PEYTAUVIE et Bedrich BENES. “Terrain Generation Using Procedural Models Based on Hydrology”. In : *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of Siggraph)* 32.4 (2013), 143 :1-143 :13 (cf. p. 5, 31, 37, 38, 41, 63, 72, 102).
- [Gén+15] Jean-David GÉNEVAUX, Éric GALIN, Adrien PEYTAUVIE, Éric GUÉRIN, Cyril BRIQUET, François GROSBELLET et Bedrich BENES. “Terrain Modeling from Feature Primitives”. In : *Computer Graphics Forum* 34.6 (2015), p. 198-210 (cf. p. 9, 10, 24, 31, 37, 41, 52, 53, 55-63, 95).
- [Ges+02] D. GESCH, M. OIMOEN, S. GREENLEE, C. NELSON, M. STEUCK et D. TYLER. “The National Elevation Dataset”. In : *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68.1 (2002), p. 5-11 (cf. p. 21).

- [Ges+18] Dean B. GESCH, Gayla A. EVANS, Michael J. OIMOEN et Samantha ARUNDEL. “Digital Elevation Model Technologies and Applications : The DEM Users Manual 3rd Edition.” In : American Society for Photogrammetry et Remote Sensing, 2018. Chap. The National Elevation Dataset, p. 83-110 (cf. p. 21).
- [GL] D GOUTX et S LADREYT. *Hydraulique des cours d'eau. La théorie et sa mise en pratique*. Cerema. Département Voies Navigables et Eau Groupe d'Hydraulique Fluviale (cf. p. 3, 87).
- [Gua+06] Yu GUAN, Wei CHEN, Lincan ZOU, Long ZHANG et Qunsheng PENG. “Modeling and rendering of realistic waterfall scenes with dynamic texture sprites”. In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 17.5 (2006), p. 573-583 (cf. p. 47).
- [Gu16] Eric GUÉRIN, Julie DIGNE, Eric GALIN et Adrien PEYTAVIE. “Sparse representation of terrains for procedural modeling”. In : *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics)* 35.2 (2016), p. 177-187 (cf. p. 24, 31, 63, 72).
- [Gué+17] Éric GUÉRIN, Julie DIGNE, Éric GALIN, Adrien PEYTAVIE, Christian WOLF, Bedrich BENES et Benoît MARTINEZ. “Interactive Example-based Terrain Authoring with Conditional Generative Adversarial Networks”. In : *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of Siggraph Asia 2017)* 36.6 (2017), 228 :1-228 :13 (cf. p. 23, 24, 38).
- [HN18] Eric HEITZ et Fabrice NEYRET. “High-Performance By-Example Noise using a Histogram-Preserving Blending Operator”. In : *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on High-Performance Graphics 2018 1.2* (août 2018), Article No. 31 :1-25 (cf. p. 60).
- [HNC02] Damien HINSINGER, Fabrice NEYRET et Marie-Paule CANI. “Interactive animation of ocean waves”. In : *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation - SCA '02*. New York, New York, USA : ACM Press, 2002, p. 161 (cf. p. 45).
- [HGA10] Houssam HNAIDI, Eric GUÉRIN et Samir AKKOUCHE. “Multiresolution control of curves and surfaces with a self-similar model”. In : *Fractals*. 3^e sér. 18 (2010), p. 271-286 (cf. p. 29).
- [Hna+10] Houssam HNAIDI, Éric GUÉRIN, Samir AKKOUCHE, Adrien PEYTAVIE et Éric GALIN. “Feature based terrain generation using diffusion equation”. In : *Computer Graphics Forum* 29.7 (2010), p. 2179-2186 (cf. p. 11, 30-32, 38).
- [Hoe11] Frans van HOESEL. “Tiled Directional Flow”. In : *ACM SIGGRAPH 2011 Posters*. SIGGRAPH '11. Vancouver, British Columbia, Canada : ACM, 2011, 19 :1-19 :1 (cf. p. 46).
- [HW04] Nathan HOLMBERG et Burkhard C. WÜNSCHE. “Efficient Modeling and Rendering of Turbulent Water over Natural Terrain”. In : *Proceedings of the 2Nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*. GRAPHITE '04. Singapore : ACM, 2004, p. 15-22 (cf. p. 44, 47).
- [Hol94] Peter HOLMGREN. “Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models : an empirical evaluation”. In : *Hydrological processes* 8.4 (1994), p. 327-334 (cf. p. 85).
- [Hor45] Robert E HORTON. “Erosional development of streams and their drainage basins ; hydro-physical approach to quantitative morphology”. In : *Geological Society of America Bulletin* 56.3 (1945), 275–370 (cf. p. 31, 83).

- [Hu+06] Yaohua HU, Luiz VELHO, Xin TONG, Baining GUO et Harry SHUM. “Realistic, real-time rendering of ocean waves”. In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 17.1 (2006), p. 59-67 (cf. p. 45).
- [Hd09] O. HUISMAN et R.A. DE BY. *Principles of geographic information systems : an introductory textbook*. English. ITC Educational Textbook Series. ITC, 2009 (cf. p. 7).
- [Igl04] A. IGLESIAS. “Computer graphics for water modeling and rendering : a survey”. In : *Future Generation Computer Systems* 20.8 (2004). Computer Graphics and Geometric Modeling, p. 1355 -1374 (cf. p. 42).
- [Irv+06] Geoffrey IRVING, Eran GUENDELMAN, Frank LOSASSO et Ronald FEDKIW. “Efficient Simulation of Large Bodies of Water by Coupling Two and Three Dimensional Techniques”. In : *ACM Transactions on Graphics* 25.3 (2006), p. 805-811 (cf. p. 43, 44).
- [Ito+03] Tomoya ITO, Tadahiro FUJIMOTO, Kazunobu MURAOKA et Norishige CHIBA. “Modeling rocky scenery taking into account joints”. In : *Proceedings of Computer Graphics International*. IEEE, 2003, p. 244-247 (cf. p. 15).
- [JD88] Susan K. JENSON et Julia O. DOMINGUE. “Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis”. In : *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54.11 (1988), p. 1593-1600 (cf. p. 84).
- [Jes+18] Stefan JESCHKE, Tomáš SKŘIVAN, Matthias MÜLLER-FISCHER, Nuttapong CHENTANEZ, Miles MACKLIN et Chris WOJTAN. “Water Surface Wavelets”. In : *ACM Trans. Graph.* 37.4 (juil. 2018), 94 :1-94 :13 (cf. p. 44, 102).
- [JW17] Stefan JESCHKE et Chris WOJTAN. “Water Wave Packets”. In : *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2017)* 36.4 (2017), 103 :1-103 :12 (cf. p. 5, 44, 102).
- [KSU07] K. Raiyan KAMAL et Yusuf SARWAR UDDIN. “Parametrically controlled terrain generation”. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*. Perth, Australia : ACM, 2007, p. 17-23 (cf. p. 29).
- [KSA13] Viktor KÄMPE, Erik SINTORN et Ulf ASSARSSON. “High resolution sparse voxel DAGs”. In : *Transaction on Graphics* 32.4 (2013), 101 :1-101 :13 (cf. p. 11).
- [KM90] Michael KASS et Gavin MILLER. “Rapid, Stable Fluid Dynamics for Computer Graphics”. In : *SIGGRAPH Comput. Graph.* 24.4 (sept. 1990), p. 49-57 (cf. p. 43, 98).
- [KMN88] Alex D. KELLEY, Michael C. MALIN et Gregory M. NIELSON. “Terrain simulation using a model of stream erosion”. In : *ACM Transactions on Graphics* (1988), p. 263-268 (cf. p. 34, 35).
- [KRS15] K. KETABCHI, A. RUNIONS et F. F. SAMAVATI. “3D Maquetter : Sketch-based 3D content modeling for digital Earth”. In : *2015 International Conference on Cyberworlds*. 2015, p. 98-106 (cf. p. 22).
- [Kim+08] Theodore KIM, Nils THÜREY, Doug JAMES et Markus GROSS. “Wavelet Turbulence for Fluid Simulation”. In : *ACM SIGGRAPH 2008 Papers*. SIGGRAPH '08. 2008, 50 :1-50 :6 (cf. p. 44).
- [KW06] Peter KIPFER et Rüdiger WESTERMANN. “Realistic and Interactive Simulation of Rivers”. In : *Proceedings of Graphics Interface 2006*. GI '06. 2006, p. 41-48 (cf. p. 44).

- [Kri+09] Peter KRIŠTOF, Bedrich BENES, Jaroslav KŘIVÁNEK et Ondřej ŠŤAVA. “Hydraulic Erosion Using Smoothed Particle Hydrodynamics”. In : *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), p. 219-228 (cf. p. 19, 34, 39).
- [Kur12] Michał KUROWSKI. “Procedural generation of meandering rivers inspired by erosion”. In : *Journal of WSCG* (2012), p. 79-86 (cf. p. 19).
- [Kur13] Michał KUROWSKI. “Procedural generation of meandering rivers with oxbow lakes”. In : *Computer Graphics International – Short Paper*. IEEE, 2013 (cf. p. 19).
- [Lad+15] L’ubor LADICKÝ, SoHyeon JEONG, Barbara SOLENTHALER, Marc POLLEFEYS et Markus GROSS. “Data-driven Fluid Simulations Using Regression Forests”. In : *ACM Trans. Graph.* 34.6 (oct. 2015), 199 :1-199 :9 (cf. p. 44).
- [Lag+09] Ares LAGAE, Sylvain LEFEBVRE, George DRETTAKIS et Philip DUTRÉ. “Procedural Noise using Sparse Gabor Convolution”. In : *Transaction on Graphics* 28.3 (2009), 54 :1-54 :10 (cf. p. 9, 26).
- [Lag+10] Ares LAGAE, Lefebvre SYVALIN, Robert L. COOK, Tony DEROSE, Georges DRETTAKIS, David S. EBERT, J. P. LEWIS, Ken PERLIN et al. “A Survey of Procedural Noise Functions”. In : *Computer Graphics Forum* 29.8 (2010), p. 2579-2600 (cf. p. 26).
- [LK11] Samuli LAINE et Tero KARRAS. “Efficient Sparse Voxel Octrees”. In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17.1 (2011), p. 1048-1059 (cf. p. 11).
- [LJ95] Joost van Pabst van LAWICK et Hans JENSE. “Dynamic Terrain Generation Based on Multi-fractal Techniques”. In : *High Performance Computing for Computer Graphics and Visualisation* (1995), p. 186-203 (cf. p. 26).
- [LP02] Anita LAYTON et Michiel van de PANNE. “A numerically efficient and stable algorithm for animating water waves”. In : *The Visual Computer* 18.1 (2002), p. 41-53 (cf. p. 44).
- [LH10] Hyokwang LEE et Soonhung HAN. “Solving the Shallow Water equations using 2D SPH particles for interactive applications”. In : *The Visual Computer* 26.6 (2010), p. 865-872 (cf. p. 44).
- [LH05] Sylvain LEFEBVRE et Hugues HOPPE. “Parallel Controllable Texture Synthesis”. In : *ACM Transactions on Graphics* 24.3 (2005), p. 777-786 (cf. p. 23).
- [LM53] Luna B. LEOPOLD et Thomas Jr. MADDOCK. *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. Rapp. tech. 1953 (cf. p. 87).
- [Lev18] Bruno LEVY. “Simulating fluids with a computer : Introduction and recent advances”. In : *arXiv preprint arXiv :1811.05636* (2018) (cf. p. 42).
- [Lew87] John-Peter LEWIS. “Generalized Stochastic Subdivision”. In : *ACM Transaction on Graphics* 6.3 (1987), p. 167-190 (cf. p. 27, 45).
- [Li+08] Yongjin LI, Yicheng JIN, Yong YIN et Helong SHEN. “Simulation of shallow-water waves in coastal region for marine simulator”. In : *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry - VRCAI '08*. New York, New York, USA : ACM Press, 2008, p. 1 (cf. p. 45).
- [LZG04] Zhilin LI, Qing ZHU et Christopher GOLD. *Digital terrain modeling : Principles and methodology*. 2004 (cf. p. 77).

- [Lin16] John B. LINDSAY. “Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models”. In : *Hydrological Processes* 30.6 (2016), p. 846-857 (cf. p. 85).
- [Lon05] Paul. LONGLEY. *Geographical information systems : principes, techniques, management, and applications*. Wiley, 2005, p. 358 (cf. p. 77).
- [LGF04] Frank LOSASSO, Frédéric GIBOU et Ron FEDKIW. “Simulating Water and Smoke with an Octree Data Structure”. In : *ACM SIGGRAPH 2004 Papers*. SIGGRAPH '04. Los Angeles, California : ACM, 2004, p. 457-462 (cf. p. 43).
- [LMS11] Falko LÖFFLER, Andreas MÜLLER et Heidrun SCHUMANN. “Real-time Rendering of Stack-based Terrains”. In : *Vision, Modeling, and Visualization (2011)*. Sous la dir. de Peter EISERT, Joachim HORNEGGER et Konrad POLTHIER. The Eurographics Association, 2011 (cf. p. 11).
- [LS12] Falko LÖFFLER et Heidrun SCHUMANN. “Generating Smooth High-Quality Isosurfaces for Interactive Modeling and Visualization of Complex Terrains”. In : *Vision, Modeling and Visualization*. Sous la dir. de Michael GOESELE, Thorsten GROSCH, Holger THEISEL, Klaus TOENNIES et Bernhard PREIM. The Eurographics Association, 2012 (cf. p. 11).
- [MFC06] Marcelo M. MAES, Tadahiro FUJIMOTO et Norishige CHIBA. “Efficient Animation of Water Flow on Irregular Terrains”. In : *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and Southeast Asia*. GRAPHITE '06. Kuala Lumpur, Malaysia : ACM, 2006, p. 107-115 (cf. p. 44).
- [MAAS15] Ali MAHDAVI-AMIRI, Troy ALDERSON et Faramarz SAMAVATI. “A Survey of Digital Earth”. In : *Computer & Graphics* 53.B (2015), p. 95-117 (cf. p. 7).
- [MB] Jean-René MALAVOI et Jean-Paul BRAVARD. *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Sous la dir. d'Onema (Office national de l'eau et des milieux AQUATIQUES) (cf. p. 3, 87).
- [Mal95] Hugh MALLINDER. “The modelling of large waterfalls using string texture”. In : *The Journal of Visualization and Computer Animation* 6.1 (1995), p. 3-10 (cf. p. 47).
- [Man82] Benoit B. MANDELBROT. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman & Co Ltd, 1982 (cf. p. 25).
- [Man88] Benoit B. MANDELBROT. “The Science of Fractal Images”. In : 1^{re} éd. Springer, 1988. Chap. Fractal Landscapes Without Creases and with Rivers, p. 243-260 (cf. p. 35).
- [MVN68] Benoit B. MANDELBROT et John W. VAN NESS. “Fractional Brownian motions, fractional noises and applications”. In : *SIAM Review – SIREV* 10.4 (1968), p. 422-437 (cf. p. 25).
- [Mar10] Nicolas MARECHAL. “Génération de contenu graphique”. In : (2010) (cf. p. 7).
- [MWM87] Gary A. MASTIN, Peter A. WATTERBERG et John F. MAREDA. “Fourier Synthesis of Ocean Scenes”. In : *IEEE Comput. Graph. Appl.* 7.3 (mar. 1987), p. 16-23 (cf. p. 45).
- [Max81] Nelson L. MAX. “Vectorized procedural models for natural terrain”. In : *Proceedings of the 8th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '81*. New York, New York, USA : ACM Press, 1981, p. 317-324 (cf. p. 6, 42, 45).
- [McC92] Ken McCLAY. *Thrust Tectonics*. Springer, 1992 (cf. p. 20).
- [MDH07] Xing MEI, Philippe DECAUDIN et Baogang HU. “Fast Hydraulic Erosion Simulation and Visualization on GPU”. In : *Pacific Graphics*. IEEE, 2007, p. 47-56 (cf. p. 18, 39).

- [MEC15] Elie MICHEL, Arnaud EMILIEN et Marie-Paule CANI. “Generation of Folded Terrains from Simple Vector Maps”. In : *Eurographics – Short Papers*. 2015 (cf. p. 20).
- [Mil86] Gavin MILLER. “The Definition and Rendering of Terrain Maps”. In : *Computer Graphics* 20.4 (1986), p. 39-48 (cf. p. 26, 27).
- [MC95] Thomas MOLLS et M. Hanif CHAUDHRY. “Depth-Averaged Open-Channel Flow Model”. In : *Journal of Hydraulic Engineering* 121.6 (1995), p. 453-465 (cf. p. 43).
- [MGL91] I. D. MOORE, R. B. GRAYSON et A. R. LADSON. “Digital terrain modelling : A review of hydrological, geomorphological, and biological applications”. In : *Hydrological Processes* 5.1 (1991), p. 3-30 (cf. p. 77).
- [MCG03] Matthias MÜLLER, David CHARYPAR et Markus GROSS. “Particle-based Fluid Simulation for Interactive Applications”. In : *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. SCA '03. San Diego, California : Eurographics Association, 2003, p. 154-159 (cf. p. 43).
- [MKM89] Forest Kenton MUSGRAVE, Craig E. KOLB et Robert S. MACE. “The synthesis and rendering of eroded fractal terrains”. In : *Computer Graphics* 23.3 (1989), p. 41-50 (cf. p. 9, 10, 13, 17, 26, 34, 38, 54).
- [Nag98] Kenji NAGASHIMA. “Computer generation of eroded valley and mountain terrains”. In : *The Visual Computer* 13.9-10 (1998), p. 456-464 (cf. p. 17, 39).
- [Nat+13] Mattia NATALI, Endre M. LIDAL, Julius PARULEK, Ivan VIOLA et Daniel PATEL. “Modeling Terrains and Subsurface Geology”. In : *Eurographics 2013 - State of the Art Reports*. Sous la dir. de M. SBERT et L. SZIRMAY-KALOS. The Eurographics Association, 2013 (cf. p. 7).
- [NWD05] B. NEIDHOLD, M. WACKER et Olivier DEUSSEN. “Interactive physically based Fluid and Erosion Simulation”. In : *Proceedings of the Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. Dublin, Ireland : Eurographics Association, 2005, p. 25-32 (cf. p. 17).
- [NP01] Fabrice NEYRET et Nathalie PRAIZELIN. “Phenomenological Simulation of Brooks”. In : *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)*. Eurographics. Springer, 2001, p. 53-64 (cf. p. 46).
- [NB11] Michael NIELSEN et Robert BRIDSON. “Guide Shapes for High Resolution Naturalistic Liquid Simulation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 30.4 (2011), 83 :1-83 :8 (cf. p. 44).
- [NF84] Gregory M. NIELSON et Richard FRANKE. “A method for construction of surfaces under tension”. In : *Rocky Mountain J. Math.* 14.1 (mar. 1984), p. 203-222 (cf. p. 35).
- [NC13] Purevtsogt NUGJGAR et Norishige CHIBA. “Markov-Type Vector Field for endless surface animation of water stream”. In : *The Visual Computer* 29.9 (2013), p. 959-968 (cf. p. 47).
- [OM84] J.F. O’CALLAGHAN et D.M. MARK. “The extraction of drainage networks from digital elevation data”. In : *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28.3 (1984), p. 323-344 (cf. p. 84, 85).
- [PG07] Renato PAJAROLA et Enrico GOBBETTI. “Survey of semi-regular multiresolution models for interactive terrain rendering”. In : *The Visual Computer* 23.8 (2007), p. 583-605 (cf. p. 7).
- [Par14] Ian PARBERRY. “Designer Worlds : Procedural Generation of Infinite Terrain from Real-World Elevation Data”. In : *Journal of Computer Graphics Techniques* 3.1 (2014), p. 74-85 (cf. p. 26).

- [Par15] Ian PARBERRY. “Modeling Real-World Terrain with Exponentially Distributed Noise”. In : *Journal of Computer Graphics Techniques* 4.2 (2015), p. 1-9 (cf. p. 26).
- [Par25] M. PARDÉ. *Le régime du Rhône : étude hydrologique*. Etudes et travaux / Université de Lyon, Institut des études rhodaniennes vol. 1. Masson, 1925 (cf. p. 76).
- [Par+19] Axel PARIS, Eric GALIN, Adrien PEYTAVIE, Eric GUÉRIN et James GAIN. “Terrain Amplification with Implicit 3D Features”. In : *ACM Transactions on Graphics* (2019) (cf. p. 10, 11).
- [PI13] Vladimir Alves dos PASSOS et Takeo IGARASHI. “LandSketch : A First Person Point-of-view Example-based Terrain Modeling Approach”. In : *Proceedings of the International Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling*. ACL, 2013, p. 61-68 (cf. p. 22).
- [Pea86] Darwyn R. PEACHEY. “Modeling waves and surf”. In : *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 20.4 (1986), p. 65-74 (cf. p. 45).
- [Per85] Ken PERLIN. “An Image Synthesizer”. In : *Computer Graphics* 19.3 (1985), p. 287-296 (cf. p. 9, 26).
- [Per89] Ken PERLIN. “Hypertexture”. In : *Computer Graphics* 23.3 (1989), p. 253-262 (cf. p. 26).
- [Per01] Ken PERLIN. “Noise Hardware”. In : *Proceedings of SIGGRAPH Course Notes*. Los Angeles, USA : ACM SIGGRAPH, 2001 (cf. p. 26).
- [PN01] Ken PERLIN et Fabrice NEYRET. “Flow Noise”. In : *Proceedings of SIGGRAPH Technical Sketches and Applications*. Los Angeles, USA : ACM SIGGRAPH, 2001 (cf. p. 46).
- [Pey10] Adrien PEYTAVIE. “Génération procédurale de monde”. In : (2010) (cf. p. 7).
- [Pey+09a] Adrien PEYTAVIE, Éric GALIN, Stéphane MÉRILLOU et Jérôme GROSJEAN. “Arches : a Framework for Modeling Complex Terrains”. In : *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), p. 457-467 (cf. p. 11, 12, 15, 32).
- [Pey+09b] Adrien PEYTAVIE, Éric GALIN, Stéphane MÉRILLOU et Jérôme GROSJEAN. “Procedural Generation of Rock Piles Using Aperiodic Tiling”. In : *Computer Graphics Forum* 28.7 (2009), p. 1801-1810 (cf. p. 15).
- [PD02] Olivier PLANCHON et Frédéric DARBOUX. “A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models”. In : *CATENA* 46.2-3 (2002), p. 159-176 (cf. p. 84).
- [Pou+04] Joachim POUDEROUX, Jean-Christophe GONZATO, Ireneusz TOBOR et Pascal GUITTON. “Adaptive Hierarchical RBF Interpolation for Creating Smooth Digital Elevation Models”. In : *Proceedings of the International Workshop on Geographic Information Systems*. Washington D.C., USA : ACM, 2004 (cf. p. 34).
- [PH93] Przemyslaw PRUSINKIEWICZ et Mark HAMMEL. “A fractal model of mountains with rivers”. In : *Proceedings of Graphics Interface*. T. 30(4). Canadian Information Processing Society, 1993, p. 174-180 (cf. p. 35, 36).
- [PM13] Alex PYTEL et Stephen MANN. “Self-organized approach to modeling hydraulic erosion features”. In : *Computers & Graphics* 37.4 (2013), p. 280-292 (cf. p. 18).
- [Qui+91] P. QUINN, K. BEVEN, P. CHEVALLIER et O. PLANCHON. “The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models”. In : *Hydrological Processes* 5.1 (1991), p. 59-79 (cf. p. 81, 83, 85).

- [QBL95] P. F. QUINN, K. J. BEVEN et R. LAMB. “The $\ln(a/\tan\beta)$ index : How to calculate it and how to use it within the topmodel framework”. In : *Hydrological Processes* 9.2 (1995), p. 161-182 (cf. p. 85).
- [RKL14] Lian P. RAMPI, Joseph F. KNIGHT et Christian F. LENHART. “Comparison of Flow Direction Algorithms in the Application of the CTI for Mapping Wetlands in Minnesota”. In : *Wetlands* 34.3 (2014), p. 513-525 (cf. p. 86).
- [RB85] William T. REEVES et Ricki BLAU. “Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems”. In : *SIGGRAPH*. 1985 (cf. p. 6).
- [Rie98] Wolfgang RIEGER. “A phenomenon-based approach to upslope contributing area and depressions in DEMs”. In : *Hydrological Processes* 12.6 (1998), p. 857-872 (cf. p. 85).
- [Ros94] David ROSGEN. “A classification of natural rivers”. In : *Catena* 22.3 (1994), p. 169-199 (cf. p. 32, 88, 90).
- [Ros96] David L. ROSGEN. *Applied river morphology*. Wildland Hydrology, 1996 (cf. p. 88).
- [RPP93] P. ROUDIER, Bernard PEROCHE et Michel PERRIN. “Landscapes synthesis achieved through erosion and deposition process simulation”. In : *Computer Graphics Forum* 12.3 (1993), p. 375-383 (cf. p. 14, 17).
- [Rui+13] X. RUI, X. SONG, Y. JU, Z. DING et J. LU. “Flow Adaptive Simulation of Dynamic Water Body Based on River Velocity Field”. EN. In : *Przegląd Elektrotechniczny* R. 89, nr (2013) (cf. p. 46).
- [RME09] Brennan RUSNELL, David MOULD et Mark G. ERAMIAN. “Feature-rich distance-based terrain synthesis”. In : *The Visual Computer* 25.5-7 (2009), p. 573-579 (cf. p. 30, 38).
- [Rya07] Geiss RYAN. “Generating Complex Procedural Terrains Using the GPU”. In : *GPU Gems 3*. T. 3. GPU Gems. Addison-Wesley Professional, 2007, p. 7-37 (cf. p. 10).
- [SR16] Faramarz SAMAVATI et Adam RUNIONS. “Interactive 3D Content Modeling for Digital Earth”. In : *The Visual Computer* 32.10 (2016), p. 1293-1309 (cf. p. 22).
- [Sau99] W.~K. SAUNDERS. “Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis”. In : *Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI International User Conference*. San Diego : ESRI, 1999, p. 1-8 (cf. p. 84).
- [Sch80] Bruce SCHACHTER. “Long crested wave models”. In : *Computer Graphics and Image Processing* 12.2 (1980), p. 187 -201 (cf. p. 42).
- [SBD13] Manuel SCHOLZ, Jan BENDER et Carsten DACHSBACHER. “Level of Detail for Real-Time Volumetric Terrain Rendering”. In : *Vision, Modeling & Visualization*. Sous la dir. de Michael BRONSTEIN, Jean FAVRE et Kai HORMANN. Eurographics Association, 2013, p. 211-218 (cf. p. 32).
- [SMK13] Filip SCHUURMAN, Wouter A. MARRA et Maarten G. KLEINHANS. “Physics-based modeling of large braided sand-bed rivers : Bar pattern formation, dynamics, and sensitivity”. In : *Journal of Geophysical Research : Earth Surface* 118.4 (2013), p. 2509-2527 (cf. p. 40).
- [SM07] Jan SEIBERT et Brian L. MCGLYNN. “A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models”. In : *Water Resources Research* 43.4 (2007) (cf. p. 86).

- [SRF05] Andrew SELLE, Nick RASMUSSEN et Ronald FEDKIW. “A Vortex Particle Method for Smoke, Water and Explosions”. In : *ACM Transactions on Graphics* 24.3 (2005), p. 910-914 (cf. p. 44).
- [Shi+07] Songxin SHI, Xiuzi YE, Zhaoxia DONG et Yin ZHANG. “Real-time simulation of large-scale dynamic river water”. In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 15.6 (2007), p. 635-646 (cf. p. 47).
- [Ski89] Andrew K. SKIDMORE. “A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model”. In : *International Journal of Geographical Information Systems* (1989) (cf. p. 79).
- [Sme+09] Ruben M. SMELIK, Klaas Jan de KRAKER, Saskia A. GROENEWEGEN, Tim TUTENEL et Rafael BIDARRA. “A survey of procedural methods for terrain modelling”. In : *Proceedings of the CASA'09 Workshop on 3D Advanced Media in Gaming and Simulation*. Amsterdam, The Netherlands, 2009, p. 25-34 (cf. p. 6).
- [Sme+14] Ruben M SMELIK, Tim TUTENEL, Rafael BIDARRA et Bedrich BENES. “A survey on procedural modelling for virtual worlds”. In : *Computer Graphics Forum* 33.6 (2014), p. 31-50 (cf. p. 6).
- [SG94] Pierre SOILLE et Christophe GRATIN. “An Efficient Algorithm for Drainage Network Extraction on DEMs”. In : *Journal of Visual Communication and Image Representation* 5.2 (1994), p. 181-189 (cf. p. 84).
- [Sol+11] Barbara SOLENTHALER, Peter BUCHER, Nuttapong CHENTANEZ, Matthias MÜLLER et Markus GROSS. “SPH Based Shallow Water Simulation”. In : *Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation "VRIPHYS" (2011)*. Sous la dir. de Jan BENDER, Kenny ERLEBEN et Eric GALIN. The Eurographics Association, 2011 (cf. p. 43, 44).
- [SS05] S. STACHNIAK et Wolfgang STUERZLINGER. “An Algorithm for Automated Fractal Terrain Deformation”. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence – 3IA*. Limoges, France, 2005, p. 64-76 (cf. p. 34).
- [Sta99] Jos STAM. “Stable Fluids”. In : *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '99. New York, NY, USA : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999, p. 121-128 (cf. p. 43, 46).
- [SD03] J STOCK et William E DIETRICH. “Valley incision by debris flows : Evidence of a topographic signature”. In : *Water Resources Research* 39.4 (2003) (cf. p. 13, 15).
- [SS17] Alexey STOMAKHIN et Andrew SELLE. “Fluxed Animated Boundary Method”. In : *ACM Transactions on Graphics* 36.4 (2017), 68 :1-68 :8 (cf. p. 47).
- [Str57] Arthur N STRAHLER. “Quantitative analysis of watershed geomorphology”. In : *Eos, Transactions American Geophysical Union* 38.6 (1957), p. 913-920 (cf. p. 83).
- [Šř08] Ondřej ŠŘAVA, Bedrich BENES, Matthew BRISBIN et Jaroslav KŘIVÁNEK. “Interactive Terrain Modeling Using Hydraulic Erosion”. In : (2008), p. 201-210 (cf. p. 18, 39).
- [ST89] R. SZELISKI et D. TERZOPOULOS. “From Splines to Fractals”. In : *Computer Graphics* 23.3 (1989), p. 51-60 (cf. p. 34).
- [TB18] François-Xavier TALGORN et Farès BELHADJ. “Real-Time Sketch-Based Terrain Generation”. In : *Proceedings of Computer Graphics International*. CGI 2018. 2018, p. 13-18 (cf. p. 38).

- [Tar97] David G. TARBOTON. “A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models”. In : *Water Resources Research* 33.2 (1997), p. 309-319 (cf. p. 85).
- [Tas+14a] Flora Ponjou TASSE, Arnaud EMILIE, Marie-Paule CANI, Stefanie HAHMANN et Adrien BERNHARDT. “First Person Sketch-based Terrain Editing”. In : *Proceedings of Graphics Interface*. Montreal, Canada : Canadian Information Processing Society, 2014, p. 217-224 (cf. p. 22).
- [Tas+14b] Flora Ponjou TASSE, Arnaud EMILIE, Marie-Paule CANI, Stefanie HAHMANN et Neil DODGSON. “Feature-based terrain editing from complex sketches”. In : *Computers & Graphics* 45 (2014), p. 101-115 (cf. p. 22).
- [TGM12] Flora Ponjou TASSE, James GAIN et Patrick MARAIS. “Enhanced Texture-Based Terrain Synthesis on Graphics Hardware”. In : *Computer Graphics Forum* 31.6 (2012), p. 1959-1972 (cf. p. 22, 23).
- [Teo09] Soon Tee TEOH. “RiverLand : An Efficient Procedural Modeling System for Creating Realistic-Looking Terrains”. In : *Proceedings of the International Symposium on Advances in Visual Computing*. Las Vegas, USA : Springer, 2009, p. 468-479 (cf. p. 37).
- [TDG00] S. THON, J.-M. DISCHLER et D. GHAZANFARPOUR. “Ocean waves synthesis using a spectrum-based turbulence function”. English. In : *Proceedings Computer Graphics International 2000*. IEEE Comput. Soc, 2000, p. 65-72 (cf. p. 45).
- [TG02] S. THON et D. GHAZANFARPOUR. “Real-time animation of running waters based on spectral analysis of Navier-Stokes equations”. In : *Advances in Modelling, Animation and Rendering*. Sous la dir. de John VINCE et Rae EARNSHAW. London : Springer London, 2002, p. 333-346 (cf. p. 47).
- [TG01] Sébastien THON et Djamchid GHAZANFARPOUR. “A semi-physical model of running waters”. In : *Computer Graphic Forum (Proceedings of Eurographics)* 19 (jan. 2001) (cf. p. 44, 47).
- [Thu+07] Nils THUREY, Matthias MULLER-FISCHER, Simon SCHIRM et Markus GROSS. “Real-time Breaking Waves for Shallow Water Simulations”. In : *Computer Graphics and Applications, Proceedings of Pacific Graphics 2007*. 2007, p. 39-46 (cf. p. 44).
- [TH10] Gregory E TUCKER et Gregory R HANCOCK. “Modelling landscape evolution”. In : *Earth Surface Processes and Landforms* 35.1 (2010), p. 28-50 (cf. p. 13, 20).
- [Tur+01] R TURCOTTE, J.-P FORTIN, A.N N ROUSSEAU, S MASSICOTTE et J.-P VILLENEUVE. “Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network”. In : *Journal of Hydrology* 240.3-4 (2001), p. 225-242 (cf. p. 84).
- [Van+11] Juraj VANEK, Bedrich BENES, Adam HEROUT et Ondřej ŠŤAVA. “Large-Scale Physics-Based Terrain Editing Using Adaptive Tiles on the GPU”. In : *Computer Graphics and Applications* 31.6 (2011), p. 35-44 (cf. p. 18, 39).
- [VMG16] Alberto Jaspe VILLANUEVA, Fabio MARTON et Enrico GOBBETTI. “SSVDAGs : Symmetry-aware Sparse Voxel DAGs”. In : *Proceedings of the 20th ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. I3D'16. Redmond, Washington : ACM, 2016, p. 7-14 (cf. p. 11).

- [VS91] L. VINCENT et P. SOILLE. “Watersheds in digital spaces : an efficient algorithm based on immersion simulations”. In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13.6 (1991), p. 583-598 (cf. p. 84).
- [Vos91] Richard F. VOSS. “Random Fractal Forgeries”. In : *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*. T. 17. Springer, 1991, p. 805-835 (cf. p. 28).
- [WL06] L. WANG et H. LIU. “An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling”. In : *International Journal of Geographical Information Science* 20.2 (2006), p. 193-213 (cf. p. 84).
- [Wan+11] Lvdi WANG, Yizhou YU, Kun ZHOU et Baining GUO. “Multiscale vector volumes”. In : *Transaction on Graphics – TOG* 30.6 (2011), 167 :1-167 :8 (cf. p. 11).
- [Wei+09] Li-Yi WEI, Sylvain LEFEBVRE, Vivek KWATRA et Greg TURK. “State of the art in example-based texture synthesis”. In : *Proceedings of Eurographics – State Of The Art*. 2009, p. 93-117 (cf. p. 23).
- [WT99] Kelin X WHIPPLE et Gregory E TUCKER. “Dynamics of the stream-power river incision model : Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs”. In : *Journal of Geophysical Research : Solid Earth* 104.B8 (1999), p. 17661-17674 (cf. p. 13, 20).
- [WIL+08] John P. WILSON, Graeme AGGETT, DENG YONGXIN et Christine S. LAM. “Water in the Landscape : A Review of Contemporary Flow Routing Algorithms”. In : *Advances in Digital Terrain Analysis*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 213-236 (cf. p. 86).
- [WHK17] Rene WINCHENBACH, Hendrik HOCHSTETTER et Andreas KOLB. “Infinite Continuous Adaptivity for Incompressible SPH”. In : *ACM Transactions on Graphics* 36.4 (juil. 2017), 102 :1-102 :10 (cf. p. 44).
- [Woj+07] Christopher WOJTAN, Mark CARLSON, Peter J. MUCHA et Greg TURK. “Animating Corrosion and Erosion”. In : *Proceedings of the Eurographics Workshop on Natural Phenomena, NPH 2007, Prague, Czech Republic, 2007*. Eurographics Association, 2007, p. 15-22 (cf. p. 39).
- [WLB16] Kathryn WOODROW, John B. LINDSAY et Aaron A. BERG. “Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction”. In : *Journal of Hydrology* (2016) (cf. p. 84).
- [Wor96] Steven WORLEY. “A cellular texture basis function”. In : *Proceedings of SIGGRAPH*. New Orleans, USA : ACM, 1996, p. 291-294 (cf. p. 26).
- [WGG99] Brian WYVILL, Andrew GUY et Éric GALIN. “Extending the CSG Tree - Warping, Blending and Boolean Operations in an Implicit Surface Modeling System”. In : *Computer Graphics Forum* 18.2 (1999), p. 149-158 (cf. p. 11, 54, 55, 63, 65).
- [Yu+10] Qizhi YU, Fabrice NEYRET, Eric BRUNETON et Nicolas HOLZSCHUCH. “Lagrangian Texture Advection : Preserving both Spectrum and Velocity Field.” In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 17.11 (2010), p. 1612-1623 (cf. p. 46).
- [Yu+09] Qizhi YU, Fabrice NEYRET, Eric BRUNETON et Nicolas HOLZSCHUCH. “Scalable Real-Time Animation of Rivers”. In : *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), p. 239-248 (cf. p. 46, 102).

- [YNS11] Qizhi YU, Fabrice NEYRET et Anthony STEED. “Feature-Based Vector Simulation of Water Waves”. In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 22.2-3 (2011), p. 91-98 (cf. p. 46, 102).
- [YHK07] Cem YUKSEL, Donald H. HOUSE et John KEYSER. “Wave Particles”. In : *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2007)* 26.3 (2007), 99 :1-99 :8 (cf. p. 44).
- [ZT87] Lyle W. ZEVENBERGEN et Colin R. THORNE. “Quantitative analysis of land surface topography”. In : *Earth Surface Processes and Landforms* 12.1 (1987), p. 47-56 (cf. p. 78).
- [Zho+07] Howard ZHOU, Jie SUN, Greg TURK et James M. REHG. “Terrain Synthesis from Digital Elevation Models”. In : *Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13.4 (2007), p. 834-848 (cf. p. 21-23, 37).

