

# Design de cascades réalistes : une méthode pour combiner contrôle interactif et modèle procédural

Arnaud Emilien<sup>1,2†</sup> Pierre Poulin<sup>1‡</sup> Marie-Paule Cani<sup>2§</sup> Ulysse Vimont<sup>2¶</sup>

<sup>1</sup> LIGUM, Dép. I.R.O., Université de Montréal

<sup>2</sup> LJK, Grenoble Universités & Inria

---

## Résumé

*Combiner génération procédurale et contrôle utilisateur est un problème crucial pour la création de scènes naturelles. Ceci est particulièrement vrai pour la modélisation de chutes d'eau : au-delà d'automatiser la création de la géométrie, un outil idéal offrirait à l'utilisateur la liberté de façonner ses cascades, tout en maintenant automatiquement la plausibilité des échanges de flux, de l'intégration au terrain et de l'aspect visuel du résultat. Nous présentons la première solution permettant la modélisation interactive de chutes d'eau cohérentes. Notre système combine l'édition vectorielle, où l'utilisateur crée, déplace, modifie ou supprime des éléments de cascade sur un terrain, avec un modèle procédural qui enrichit ces éléments à partir des échanges hydrauliques, renforce la cohérence entre le terrain et l'écoulement, et génère une géométrie détaillée ainsi que des textures animées pour les chutes et pour leur environnement. Le modèle est interactif, offrant un retour visuel quasi immédiat après chaque édition. De plus, il permet de choisir le degré de contrôle utilisateur : ainsi, soit le terrain se déforme en fonction de trajectoires d'eau entièrement contrôlées par l'utilisateur, soit ces trajectoires sont d'abord rendues plausibles par adaptation locale au terrain, avant que ce dernier ne se déforme au besoin pour assurer la cohérence.*

---

**Mots clé :** Informatique graphique, modélisation géométrique, génération procédurale, cascades, terrains

## 1. Introduction

La génération procédurale est une approche très puissante pour créer des scènes complexes, et elle a été appliquée dans de nombreux contextes (terrains, arbres, bâtiments, villes, etc.). L'un de ses atouts est sa capacité à assurer que des contraintes soient respectées – par exemple d'un point de vue physique, biologique ou architectural – facilitant pour l'utilisateur la création de modèles plausibles.

Cependant, du fait de leur contrôle indirect, paramétrer ces modèles pour obtenir un résultat spécifique est extrêmement difficile. Dans ces situations, il serait idéal d'avoir accès à un système interactif pour créer une scène grossière, de laisser au modèle procédural le soin de générer tous les détails fins, et d'être capable de modifier la scène en ré-éditant les parties non satisfaisantes, combinant ainsi les avantages

de l'édition manuelle et de la génération procédurale. Dans cet article, nous appliquons ce principe nouveau à une tâche difficile : la modélisation interactive de chutes d'eau.

Bien que les cascades offrent quelques-uns des plus beaux paysages naturels, aucune méthode facilitant leur création n'a encore été proposée en informatique graphique : une première solution consiste à simuler un fluide s'écoulant sur un terrain, qui peut subir une simulation d'érosion ou bien être sculpté par l'utilisateur pour contrôler le résultat. Cette approche pose un problème de contrôle indirect particulièrement difficile, la chute calculée dépendant des pentes, des collisions, des lits de rivières éventuellement déjà présents sur le terrain, ainsi que des propriétés du modèle de fluide. Une seconde possibilité est de créer les cascades avec des logiciels de modélisation standards, en utilisant un ensemble de maillages ou des systèmes de particules où seront plaquées des textures. Lors de ce long processus de design manuel, l'utilisateur devra en permanence vérifier la cohérence visuelle entre le terrain et la chute d'eau, ainsi que la cohérence des éléments de la chute entre eux.

Notre solution, basée sur un nouveau modèle procédural interactif dédié aux chutes d'eau, permet à l'utilisateur de concevoir facilement des cascades complexes, tout en renforçant (s'il le souhaite) la cohérence physique du résultat. Nos contributions principales sont les suivantes :

---

† Arnaud.Emilien@inria.fr

‡ poulin@iro.umontreal.ca

§ Marie-Paule.Cani@inria.fr

¶ ulysse.vimont@inria.fr

- une classification des chutes d'eau basée sur un diagramme pente/débit;
- trois modèles paramétriques pour représenter et contrôler un réseau de chutes;
- un modèle procédural pour assurer la cohérence du réseau de chutes;
- des méthodes d'adaptation du terrain à la chute, mais aussi de la chute au terrain;

Les chutes d'eau ainsi créées, ainsi que le terrain modifié dans lequel elles s'intègrent, peuvent être utilisés directement comme environnement virtuel pour les jeux vidéo ou les films, ou encore être repris en tant que configuration initiale à raffiner en vue d'une simulation physique plus complète.

## 2. État de l'art

De nombreuses méthodes procédurales ont été mises au point pour des types particuliers d'objets, comme les terrains (fractales, modèles de bruits), les océans (sommes de cosinus), les plantes (systèmes L), les bâtiments (grammaires de formes), les villes (combinaisons de techniques), etc. Ces méthodes ont prouvé leur efficacité dans leurs domaines respectifs, mais elles sont souvent laborieuses à contrôler, même pour des utilisateurs expérimentés. À l'exception de la génération procédurale inverse (e.g., [TLL\*11]), loin d'être interactive, ces méthodes n'offrent pas de moyens de contrôle intuitif du résultat. En raison du petit nombre de travaux antérieurs sur la modélisation de cascades, cet état de l'art présente aussi (de manière non exhaustive) des solutions qui nous ont inspirés parmi les méthodes de génération de terrains et de rivières.

### 2.1. Terrains

Les terrains sont généralement représentés comme des cartes d'élévations  $2D\frac{1}{2}$ , bien adaptées au GPU même pour les terrains de grande taille (e.g., [LH04, BN08]). Peytavie et al. [PGGM09] introduisent un modèle d'empilement pour modéliser des structures particulières, comme des surplombs et des cavernes. De telles structures peuvent être observées au sommet des chutes ou près des bassins de réception. Dans notre travail, nous reprenons plutôt la méthode de Gamito et Musgrave [GM01], par carte de déplacements horizontaux, pour représenter ces structures.

De nombreuses solutions ont été proposées pour créer des terrains, allant de méthodes entièrement procédurales à celles combinant des exemples ou des textures et utilisant l'édition par croquis [SDKT\*09, STdKB10, HGA\*10, BMV\*11, TGM13]. Même si des terrains réalistes peuvent être générés directement à partir d'un réseau hydraulique [Teo09, GGG\*13], nous utilisons une approche par éléments caractéristiques nous permettant de modifier localement le terrain existant à proximité de la cascade créée. Nous nous appuyons ainsi sur la diffusion de contraintes

vectérielles [HGA\*10, BMV\*11], mais nos contraintes sont des déplacements relatifs et non des positions absolues, de manière à préserver toute sa complexité.

### 2.2. Rivières

Puisque nous nous intéressons à des écoulements créés par un utilisateur, les méthodes de simulation d'écoulements de faible profondeur utilisées pour calculer la trajectoire d'une rivière sur un terrain, ne seront pas décrites ici. Cependant, nous nous sommes inspirés pour nos chutes d'eau des méthodes de rendu visuel de rivières par textures animées, présentées ci-dessous.

Yu et al. [YNBH09] tirent leurs animations de textures du mouvement de particules simulées à la surface d'une rivière. Ces textures, qui offrent l'apparence d'un fluide complexe, peuvent être enrichies de petites vagues provoquées par la présence de rochers [YNS11]. Hendrickx et al. [HSB10] présentent une solution pour le rendu de rivières représentées sous forme de courbes de Bézier. Van Hoesel [vH11] pave des textures de déplacements et module leurs contributions sur l'eau en fonction de la vitesse de celle-ci. Cette méthode est simple, compacte et efficace.

Notre animation de texture est inspirée par tous ces travaux, incluant en outre une technique d'édition de flux à base de croquis [ZIH\*11].

### 2.3. Cascades

Deux grandes méthodes existent pour créer interactivement et visualiser des cascades animées : des systèmes de particules et des maillages texturés.

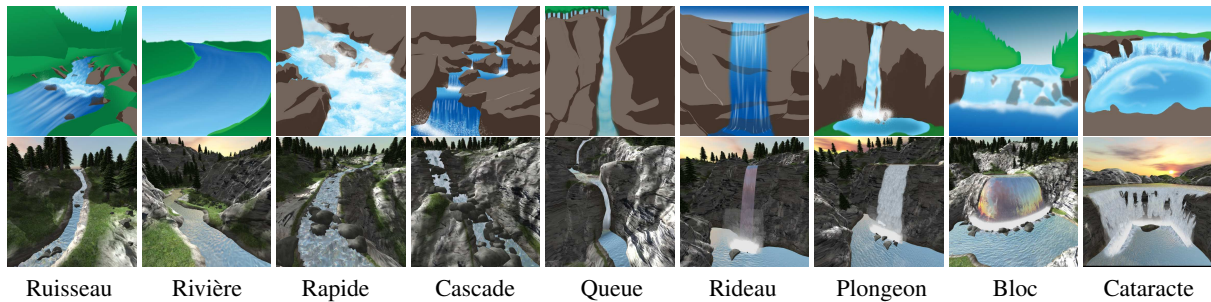
Les systèmes de particules [SDZ\*07], même optimisés avec des méthodes hiérarchiques ou en espace écran [BSW10], souffrent de leur complexité inhérente : il est difficile de simuler efficacement des réseaux complexes de chutes d'eau sur un vaste terrain. Sakaguchi et al. [SDZ\*07] pré-configurent des systèmes de particules pour obtenir différents types de cascades, qui peuvent être assemblés pour créer un réseau de chutes d'eau. La cohérence entre le terrain et les chutes doit néanmoins être assurée par l'utilisateur.

Animer des textures sur un maillage est une approche bien plus efficace [GCZ\*06], qui peut être enrichie par quelques particules décoratives [HW04].

Dans le cadre différent de la synthèse de séquences vidéo, Bhat et al. [BSHK04] génèrent une séquence de cascades animées à partir d'une vidéo initiale et d'un croquis indiquant la forme désirée pour la nouvelle cascade.

## 3. Modélisation de chutes d'eau

Dans cette section, nous définissons le concept de chute d'eau, étudions leur classification géométrique, et ex-



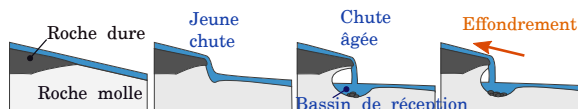
**Figure 1:** Différents types de chutes, représentées par un artiste (ligne du haut), et modélisées en 3D avec notre méthode (ligne du bas).

pliquons comment nous avons conçu notre méthode à partir de cette analyse.

### 3.1. Les chutes d'eau : un phénomène naturel

Pour bien comprendre la forme et la complexité des chutes d'eau, il faut avoir une idée de la manière dont elles se forment dans la nature : lorsqu'une rivière traverse la jonction entre un sol dur et un sol plus mou, l'érosion s'y fait à différentes vitesses, causant la formation d'une cascade, qui deviendra ensuite une chute libre dans un bassin, comme illustré par la figure 2. Pour plus de détails, voir l'encyclopédie [Car82].

Ce processus d'érosion se déroule généralement à différentes vitesses en différents points du cours d'eau, et d'autres flux peuvent se joindre là où le terrain est érodé; ceci peut produire des chutes d'eau de grande taille, ayant la forme d'un réseau complexe de chutes, comme illustré sur la photographie de la figure 16.



**Figure 2:** Les sols durs et mous ont des vitesses d'érosion différentes, causant l'apparition d'une chute.

### 3.2. Classification basée sur un diagramme pente/débit

De nombreuses classifications de chutes d'eau ont été proposées par des hydrologues-géologues et/ou par des artistes, comme celle représentée dans la partie supérieure de la figure 1. Il existe deux grandes familles de classifications, celles basées sur le volume et celles basées sur la géométrie. Les classifications basées sur le volume d'eau [Bei06] permettent de déduire la classe d'une cascade en calculant son volume d'eau, ce qui peut donc être fait automatiquement dans un algorithme. Cependant, cette classification n'offre

aucune information visuelle sur la cascade et il est donc impossible de savoir quoi générer en fonction de la classe déduite. À l'inverse, les classifications géométriques [DD06] sont basées sur la description visuelle de la cascade, ce qui est plus approprié pour des artistes. Cependant, il est difficile de savoir à quel moment utiliser un type particulier.

Notre approche consiste à associer aux types géométriques des informations quantitatives. En effet, en étudiant les classifications déjà proposées (figure 1) et en observant de nombreux cas réels, nous avons remarqué que le type géométrique d'une chute dépend principalement de deux paramètres : son débit et la pente du terrain. En effet, en réduisant son débit, une rivière devient un ruisseau, une cascade devient une queue de cheval, ou une cataracte, un plongeon. Augmenter la pente transforme une rivière en rapide ou en bloc. De plus, il y a une séparation nette entre les chutes qui restent en contact avec le terrain (correspondant à des terrains moins érodés, cf. jeune chute figure 2), et des chutes libres tombant dans un bassin de réception. Cette considération sépare nos chutes en deux types distincts : celles en contact et celles en chute libre. Nous proposons ainsi une classification qui offre à l'utilisateur un contrôle intuitif, tout en lui permettant d'obtenir des résultats couvrant la plupart de types de chutes d'eau existantes.

Cela mène à notre nouvelle classification basée sur un diagramme débit/pente représenté à la figure 4, où tous les types de cascades sur la gauche appartiennent à la catégorie contact, tandis que ceux à droite appartiennent à la catégorie chute libre. Nous expliquons dans ce qui suit comment nous utilisons cette classification autant pour le contrôle utilisateur haut niveau que pour générer des résultats plausibles.

**Définitions.** Dans la suite de cet article, nous appelons *chute d'eau* un réseau d'éléments de types *contacts*, *chutes libres* ou *bassins* (ces derniers étant des cas particuliers de contact), connectés entre eux par des noeuds représentant des sources, des puits et des jonction. Les *contacts* sont les portions d'une chute en contact avec le terrain, et les *chutes libres* celles qui ne le sont pas.

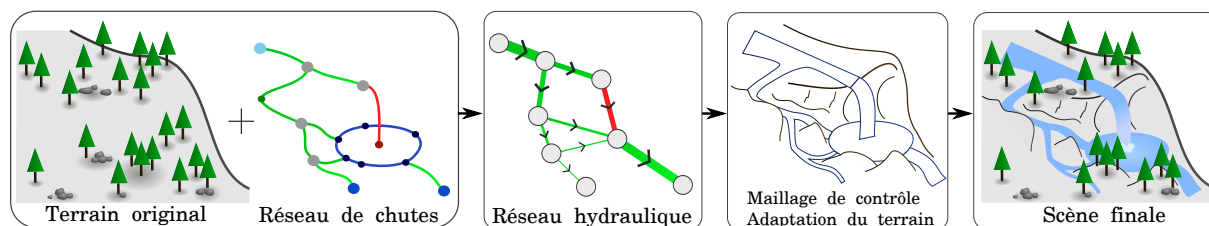


Figure 3: Vue d'ensemble du processus de création et d'édition de cascades.

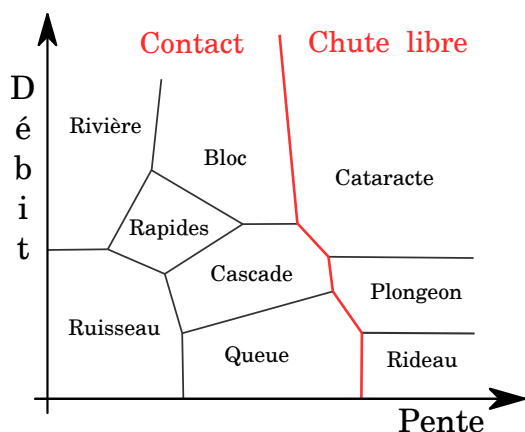


Figure 4: Notre classification des types de cascades.

Un tel réseau est issu de l'ensemble des contrôleurs édités par l'utilisateur. L'objectif de notre travail est de fournir des outils de création capables de gérer de tels réseaux complexes.

### 3.3. Vue d'ensemble

Notre solution pour concevoir des chutes est basée sur trois modèles paramétriques : les bassins, les contacts et les chutes libres. Tous les sous-types de cascades de la figure 4 sont définis comme des ensembles de paramètres au sein des modèles de contacts ou de chutes libres. Cette approche a deux avantages : tandis que l'utilisateur contrôle l'aspect visuel d'un réseau de chutes à haut niveau, en créant explicitement des contacts, des chutes libres et des bassins, le système est capable de vérifier leur plausibilité ainsi que de calculer le sous-type le plus réaliste en fonction de la pente et du débit. Le modèle est ainsi paramétré automatiquement, pour aboutir à l'un des modèles 3D présentés à la figure 1 (ligne du bas).

Notre système procédural interactif se compose de quatre étapes, couplant actions utilisateur et générations procé-

durales, et fournissant un retour visuel quasi immédiat (la figure 3) :

1. L'utilisateur crée une cascade en *construisant un réseau d'éléments vectoriels*, au-dessus, sur ou même en-dessous d'un terrain existant, appelés contrôleurs vectoriels. Les contacts et bassins sont créés interactivement en manipulant les points de contrôle de courbes de Hermite. Les chutes libres sont définies par deux extrémités, la plus basse étant placée à l'intérieur d'un bassin. Le réseau contient des sources dont l'utilisateur définit le débit initial, des embranchements où l'eau se sépare ou se rejoint, et des puits où l'eau disparaît.
2. Le réseau hydraulique est un graphe orienté créé à partir de ces contrôleurs. Étant donné le débit initial des sources, le système *résout les équations de débits* pour chaque noeud du graphe, et vérifie la plausibilité de la pente.
3. *La chute d'eau ensuite est intégrée au terrain* de manière cohérente. Ceci est réalisé à l'aide d'un maillage de contrôle, généré à partir du réseau, et de contraintes de déformations diffusées pour adapter le terrain à la chute. De plus, l'utilisateur peut choisir entre deux modèles d'intégration : soit le terrain s'adapte totalement aux éléments créés par l'utilisateur, soit les éléments sont dans un premier temps déformés pour s'adapter à la forme du terrain, ce qui donne une forme bien plus plausible, avant une adaptation éventuelle du terrain qui assure la cohérence. Ce processus, qui augmente grandement le réalisme, est basé sur une subdivision récursive des segments de chutes en de plus petits segments.
4. Enfin, le sous-type de chaque élément est calculé à partir de ses coordonnées dans le diagramme pente/débit, permettant soit au modèle contact, soit au modèle chute libre d'être appelé avec des paramètres spécifiques pour *générer les détails géométriques et visuels appropriés*. Des détails plausibles, comme des rochers et des plantes, sont aussi générés dans tout le voisinage.

## 4. Créer un réseau de chutes valide

### 4.1. Édition du réseau

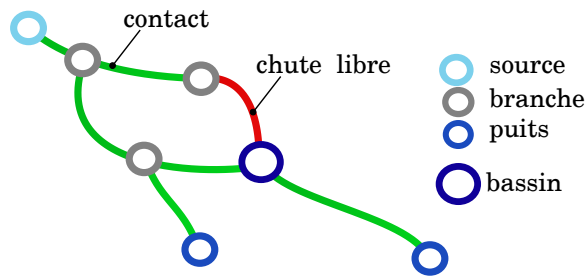
L'utilisateur crée un réseau de chutes en manipulant différents éléments vectoriels. Ce réseau est représenté par un

graphe orienté (figure 5), dont les arcs sont les contacts et les chutes libres, et les noeuds sont les bassins, branches, sources et puits. Les branches, sources et puits sont ajoutés automatiquement lors de la création d'un élément de la cascade, ou lorsqu'ils sont connectés ou déconnectés.

Pour créer un contact, l'utilisateur insère une courbe de Hermite sur le terrain en positionnant ses points de contrôle, et définit (si désiré) pour chaque point de contrôle un décalage par rapport à la hauteur locale du terrain. Pour les bassins, l'utilisateur positionne dans un premier temps un plan horizontal dans la scène, puis dessine sur celui-ci une courbe fermée. Une chute libre est créée en positionnant son point de départ et celui d'arrivée sur le terrain.

Pour faciliter la connexion entre les éléments, nous utilisons des aimants pour les points et les courbes, comme dans les outils classiques d'édition vectorielle. En outre, l'utilisateur peut insérer, supprimer ou déplacer les points de contrôle sur chaque courbe, mais aussi éditer les paramètres de chaque élément.

Enfin, certaines contraintes sont renforcées par défaut, comme la présence d'un bassin en bas d'une chute libre : l'ajout d'une chute libre déclenche l'ajout automatique d'un bassin de réception en aval.



**Figure 5:** Un graphe contenant divers éléments de cascades connectés entre eux. Les sources et les puits spécifient l'orientation du réseau.

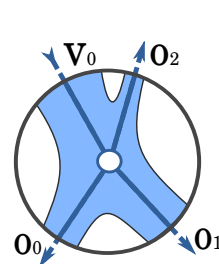
#### 4.2. Plausibilité du réseau

Le réseau de chutes est un graphe orienté, dont le flux provient des sources et sort par les puits. Pour que l'écoulement de la chute soit cohérent, le système doit s'assurer que toutes les pentes permettent à l'eau de couler dans la bonne direction. Afin de résoudre ce problème, nous utilisons un tri topologique, et les noeuds du graphe sont traversés dans l'ordre des dépendances. Chaque noeud parent force ses enfants à être géométriquement plus bas que lui. Une pente minimale peut être garantie entre les noeuds, et par conséquent augmenter la plausibilité de l'écoulement. Cette approche fonctionne de la même façon sur tous les éléments du graphe, notamment sur les bassins et branches dont la hauteur doit être inférieure à la hauteur minimale de tous les éléments entrants.

#### 4.3. Paramétrisation à partir des contraintes hydrauliques

Il serait coûteux et contre-intuitif d'effectuer une simulation physique complexe de l'écoulement de l'eau sur le terrain pour en déduire ses propriétés (intensité, vitesse, etc.). De plus, dans le cas où l'utilisateur choisit de ne pas adapter sa cascade au terrain, alors cette simulation n'aurait aucun sens. Notre approche s'inspire du système d'édition interactif de Zhu et al. [ZIH\*11], et nous simplifions notre modèle hydraulique en un graphe de "tuyaux", en résolvant dans un premier temps les échanges de flux entre les éléments qui se déroulent dans les noeuds du graphe. Les autres propriétés de l'écoulement (comme la vitesse ou la largeur d'une rivière) seront déterminées plus tard; nous détaillons ces calculs dans la section 5.2.

**Cohérence du débit :** Un réseau de cascades doit être en équilibre, i.e., le débit total sortant doit être égal au débit total entrant. Ce système d'équations est résolu comme un réseau contraint par ses entrées et ses sorties. Puisque l'utilisateur peut modifier manuellement la répartition du débit à chacun des embranchements, ces données font aussi partie de la résolution. Afin de pouvoir résoudre cette répartition de manière efficace et avec un comportement naturel, nous proposons des fonctions simples et intuitives.



**Figure 6:** Répartition d'un flux entrant entre trois branches sortantes.

**Répartition aux embranchements :** Le débit sortant d'un ensemble de segments connectés sur une branche dépend des angles entre les flux entrants et sortants, simulant ainsi le cours naturel de l'eau. En effet, nous nous attendons à ce que le cours d'eau suive sa direction originale. Comme l'illustre la figure 6, le débit sortant d'une branche  $j$  est pondéré par  $w_{ji}$  dépendant du produit scalaire avec chacun des éléments entrants  $i$  de la branche :

$$w_{ji} = 1 + (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{o}_j)$$

Le débit sortant est normalisé :  $\text{débit}_j = \sum_i \text{débit}_i \frac{w_{ji}}{\sum_j w_{ji}}$ .

**Répartition dans les bassins :** Les débits des éléments entrants des bassins sont distribués de manière égale à tous les éléments sortants, à moins que ce ne soit spécifié autrement. Ceci est basé sur l'hypothèse que la vitesse moyenne dans un bassin est trop faible pour influencer la répartition des débits. Par défaut, pour  $n$  éléments sortants, la répartition correspond simplement à  $w_{ji} = \frac{1}{n}$ .

#### 5. Génération des chutes

Les solutions présentées ci-dessous sont conçues pour préserver un contrôle intuitif pour l'utilisateur, tout en of-

frant une aide capable de rendre le résultat le plus plausible possible, et ce en temps interactif.

### 5.1. Subdivision des éléments en contact

De manière à enrichir procéduralement les courbes de Hermite créées par l'utilisateur, nous utilisons une subdivision fractale basée sur la technique du *mid-point displacement*. L'intervalle du déplacement maximum dépend de la longueur du segment considéré, mais aussi de la pente (car une cascade tend à descendre tout droit dans une pente) et du débit (car un flux large tend à avoir une courbe plus lisse) :

$$\text{intervalle} = \text{bruit} \times \text{longueur} \times e^{\left(-\frac{\text{pente}}{\alpha}\right)} \times e^{\left(-\frac{\text{débit}}{\beta}\right)}$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes, tandis que *bruit* désigne l'amplitude du bruit et *longueur* la longueur du segment à subdiviser (comme pour le *mid-point displacement*).

Nous décrivons dans la section 6.2 une amélioration de cette subdivision naïve, qui permet d'adapter la cascade au terrain.

L'intensité du bruit et le choix du type de subdivision (naïve ou adaptée au terrain) sont définis par l'utilisateur.

### 5.2. Type de chute et propriétés internes

**Type de chute :** Nous avons calculé pour chaque élément de la chute d'eau sa pente et son débit. Ces valeurs définissent automatiquement à quel type de chute cet élément appartient, grâce au diagramme pente-débit de la figure 4.

Dans le cas où l'utilisateur n'a pas créé un segment plausible (par exemple s'il crée une chute libre sur un terrain plat, ou un contact sur une pente trop forte), l'élément sera hors de l'intervalle de validité du diagramme pente-débit. Dans ce cas, le modèle paramétrique est toujours défini, en utilisant le type le plus proche, mais l'utilisateur est averti de l'incohérence (par un changement de couleur). L'utilisateur peut alors valider sa conception (même si irréaliste), ou bien définir un réseau plus plausible.

**Propriétés internes :** A partir de l'intensité du débit et de la forme d'un élément de la cascade, nous calculons sa largeur, sa profondeur et sa vitesse, qui seront utilisées pour générer le maillage de contrôle, permettant de définir des contraintes sur le terrain ou d'autres effets visuels comme l'animation de l'eau. Or, nous avons trois variables et une seule équation

$$\text{débit} = \text{vitesse} \int_{\text{largeur}} \text{profondeur}.$$

Nous décidons pour résoudre cette équation de d'abord calculer la vitesse de manière indépendante, de poser la profondeur comme étant une fonction de la largeur, puis de calculer la largeur à l'aide de l'équation précédente. Nous proposons ici encore un ensemble de fonctions et intuitives pour calculer ces variables.

Nous définissons la vitesse comme étant proportionnelle à la pente :  $\text{vitesse} = k \times \text{pente}$ .

Pour un type de cascade donné, sa profondeur maximale est calculée comme une fonction de sa largeur. Soit  $C$  une constante,  $\text{profondeur} = \text{largeur}/C$ .

Étant donnée cette profondeur, l'intégrale définissant le débit d'un cours d'eau peut être simplifiée en :

$$\text{débit} = \frac{1}{2} \text{vitesse} \times \text{largeur} \times \text{profondeur}.$$

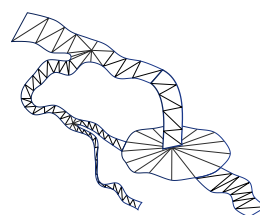
Ceci revient à considérer une section de rivière triangulaire, mais d'autres profils peuvent être utilisés, comme cela a été fait dans l'article de Gênevaux et al. [GGG\*13].

Nous pouvons enfin en déduire la valeur de la largeur à donner à ce segment de chute :

$$\text{largeur} = \sqrt{\frac{2C \times \text{débit}}{\text{vitesse}}}.$$

### 5.3. Maillage de contrôle

Après avoir calculé les propriétés internes de tous les segments, nous générons un maillage représentant une géométrie grossière de la surface de notre réseau de rivières : le maillage de contrôle. Il sera utilisé pour créer les contraintes du terrain, les textures de vitesses, ainsi que diverses cartes servant lors de la génération procédurale (comme les rochers, l'écume, les perturbations de l'eau, etc.) et d'autres cartes visuelles (changement de la texture du terrain, fausses caustiques, etc.).



**Figure 7:** Maillage de contrôle généré à partir du graphe présenté à la figure 5.

Les maillages des éléments de contacts sont calculés par extrusion de la courbe les représentant, dans la direction horizontale normale à cette courbe, de la largeur calculée précédemment (figure 7). Nous faisons particulièrement attention aux connexions des maillages aux branches, afin qu'aucun d'entre eux ne se superpose. Les maillages des chutes libres

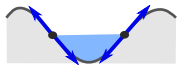
sont calculés par extrusion depuis le contour du maillage de l'élément incident (par exemple le bord d'un bassin) et suivant la courbe de la chute. Les maillages des bassins sont de simples triangulations de la région délimitée par l'utilisateur.

## 6. Cohérence avec le terrain

### 6.1. Adaptation du terrain aux cascades

Il s'agit maintenant de déformer localement le terrain pour qu'il vienne épouser la forme du réseau cohérent de chutes d'eau défini par l'utilisateur. Bien que nous nous inspirions de la méthode de Hnaidi et al. [HGA\*10], basée sur la résolution d'une équation de Poisson pour propager un ensemble de contraintes vectorielles, notre solution diffère de celle-ci : en effet, nous souhaitons propager des déformations (i.e., des changements de hauteurs) plutôt que des hauteurs absolues, pour que le terrain garde toute sa complexité. Nous générons ces contraintes à l'aide de notre modèle procédural. L'un des avantages de cette approche est que les détails fins du terrain d'origine sont préservés par la déformation.

Le terrain est représenté par une carte d'élévations, sur laquelle une carte de déformations est appliquée pour adapter le terrain à la cascade. Nous convertissons les hauteurs des éléments de la scène en hauteurs relatives au terrain, pour appliquer une déformation à ce dernier.



**Figure 8:** Contraintes de hauteur et de gradient pour un contact.

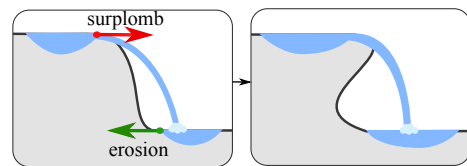
**Contraintes de bordures.** Des contraintes de positions et de tangentes sont créées sur le contour du maillage de contrôle correspondant (figure 8). Seuls les contours des contacts sont considérés à cette étape. Ils permettent de créer des rivages de largeurs précises, leur profondeur étant, comme nous l'avons vu, fonction des propriétés internes du flux.

**Contraintes de connexions.** Afin de creuser l'intérieur des bassins, nous échantillons l'intérieur de son maillage, et définissons la profondeur comme proportionnelle à la profondeur du bassin et à la distance de ses bords. D'autres contraintes sont prises en compte. Par exemple, le lit de la rivière propage ses déformations dans les bassins, de façon à simuler le fait que le flux entrant ait creusé la jonction avec le bassin (figure 9).



**Figure 9:** Sans et avec les contraintes de connexion entre les contacts et les bassins.

**Contraintes de surplombs.** Enfin, le terrain est aussi modifié avec des surplombs en haut des chutes, et des cavernes sont creusées sous les chutes au niveau des bassins. Comme illustré à la figure 10, nous représentons ces modifications comme deux contraintes de déplacement opposées, avec le sommet du surplomb s'étendant hors du terrain dans la direction de la chute, et le bas situé au niveau du bassin s'étendant dans la falaise, à cause de l'érosion qui creuse celle-ci. En diffusant ces déplacements vectoriels d'une manière analogue à la diffusion des contraintes de hauteur, nous générons le champ de déformation horizontal permettant la création de surplombs.



**Figure 10:** Déplacement horizontal permettant de représenter les surplombs sur le terrain.

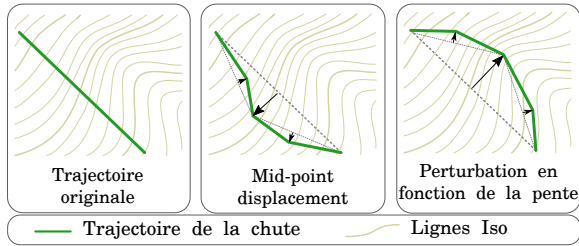
### 6.2. Adaptation des chutes au terrain

Avec la méthode de la section précédente, des éléments de chutes créés au-dessus ou en-dessous du terrain déforment le terrain, qui s'adapte à ces contraintes. Néanmoins, dans certaines situations, l'utilisateur peut préférer adapter tout d'abord sa cascade au terrain existant, avec l'aide automatisée du système, de manière à la rendre plus réaliste. Le terrain se déforme ensuite également pour respecter les contraintes d'écoulement.

**Projection :** Les éléments de la cascade (e.g., les points de contrôle) créés par l'utilisateur sont dans un premier temps projetés sur le terrain, tout en préservant les contraintes d'écoulement dans le graphe. La hauteur d'un bassin est définie comme la hauteur moyenne des projections sur le terrain de tous ses points de contrôle.

**Subdivision et adaptation :** Afin d'adapter au mieux la trajectoire d'un segment sur le terrain, nous utilisons une heuristique basée sur le *mid-point displacement*. Pour un point du segment, nous recherchons le point le plus bas dans son intervalle de déplacement maximal, afin de respecter l'écoulement naturel de l'eau. Les deux segments créés sont subdivisés récursivement jusqu'à ce que la résolution du terrain soit atteinte. Du bruit est aussi ajouté lorsque le terrain est trop plat. Ce processus est illustré par la figure 11.

Enfin, nous nous assurons qu'après la subdivision, les contraintes d'écoulement dans le graphe sont toujours respectées, en réutilisant la méthode décrite à la section 6.1.



**Figure 11:** Subdivision des contacts pour s'adapter à la forme du terrain.

Type	Pente	Débit	Écume	Rochers	Pert.	Part.
Rideau	90	10	0	0.3	0	0
Plongeon	90	20	1	0.4	0	0.2
Rebord	90	50	0	0.5	0	0.5
Cataract	90	80	1	1	1	1
Ruisseau	10	20	0	0.2	0	0
Rivière	5	50	0	0.2	0.1	0
Rapide	10	50	0.2	0.5	0.5	0
Queue	50	20	1	0	0	0
Cascade	30	30	0.5	1	1	0
Bloc	50	60	1	0	0.2	0

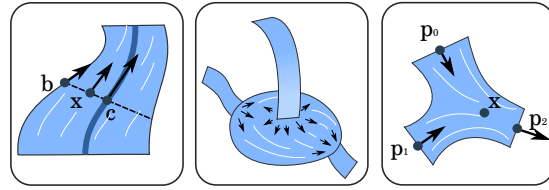
**Table 1:** Propriétés de chaque type de cascade. Les coordonnées (pente, débit) indiquent leur position dans le diagramme de classification (figure 4). Ces coordonnées ont été positionnées à partir de nos observations, et ont plus pour but de distinguer les chutes entre elles que de correspondre à des valeurs réelles. Les pentes indiquent l'inclinaison moyenne en degrés, les débits quant à eux représentent des proportions entre les différents types. Écume, rochers, perturbation et particules sont des paramètres utilisés pour la génération procédurale et le rendu.

## 7. Génération des détails, des textures et des shaders

### 7.1. Champ de vitesse

Le champ de vitesse de l'eau est généré pour l'ensemble du terrain et stocké dans une texture, de la même résolution que la carte d'élévations du terrain. Dans un premier temps, chaque élément de la cascade calcule le champ de vitesse à la surface de son maillage de contrôle, en utilisant les vitesses des éléments du réseau calculées précédemment comme des contraintes de bordure. Ces vitesses sont calculées différemment pour les contacts, bassins et branches, pour mieux correspondre à leurs contraintes visuelles; elles sont illustrées à la figure 12 et détaillées ci-dessous. Ces vitesses sont utilisées pour animer la surface de l'eau, grâce à une carte de déplacements animée à l'aide de tuiles [vH11].

**Contact :** Pour simuler le fait qu'une rivière coule plus vite en son centre que sur son rivage, nous introduisons une décroissance linéaire de la vitesse sur toute sa largeur. Pour



**Figure 12:** Calcul des vitesses internes pour les contacts (gauche), les bassins (centre) et les branches (droite).

une coupe transversale de la rivière, étant donné son point central  $c$  le point de rivage  $b$ , la vitesse au point  $x$  est donnée par vitesse $_x = \text{vitesse}_c \left(1 - \frac{\|x-c\|}{\|b-c\|}\right)$ .

**Bassin :** La vitesse de l'eau dans un bassin dépend de ses éléments entrants et sortants, de leur taille et de leur vitesse. Pour calculer la vitesse à l'intérieur de celui-ci, nous effectuons un nombre fixe d'étapes d'une résolution de fluide 2D [Sta99] dans l'enceinte du bassin, implémentée en GPU par un *compute shader*.

**Branches :** Nous devons interpoler la vitesse de l'eau entre tous les éléments entrants et sortants. Pour cela, nous utilisons une technique classique de pondération par la distance inverse, où chaque élément entrant  $p_i$  est considéré comme une contrainte de vitesse vitesse $_i$ . La vitesse pour un point  $x$  dans la branche est calculée via l'équation : vitesse $_x = \sum_i \omega_i \text{vitesse}_i$ , dont les pondérations sont calculées par

$$\tilde{\omega}_i = \prod_j \left(1 - \frac{\|x - p_i\|}{\|p_j - p_i\|}\right)$$

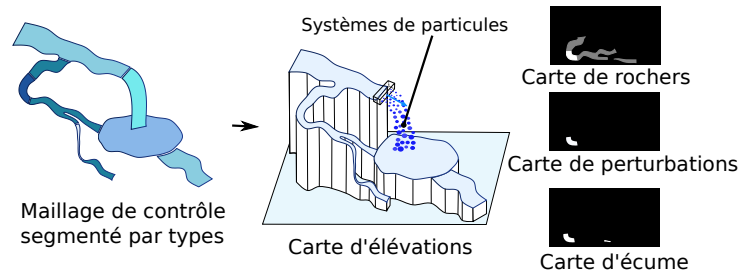
puis normalisée :  $\omega_i = \frac{\tilde{\omega}_i}{\sum_i \tilde{\omega}_i}$ .

### 7.2. Rendu de l'eau

**Représentation des contacts, branches et bassins :** Le maillage de contrôle, introduit à la section 5.3, est utilisé pour générer les contraintes d'érosion, calculer les vitesses sur le terrain, etc. Il doit être distingué du maillage de rendu de l'eau utilisé pour représenter les éléments en contact. La surface des éléments en contact est représentée par une carte d'élévations; elle est pavée (comme le terrain) et est détaillée à l'aide d'une carte de déplacement permettant de simuler les vagues.

La surface de l'eau est rendue avec des effets classiques de rendu temps réel d'eau, comme la réflexion miroir du ciel, la réflectance spéculaire, la transparence et les fausses caustiques dans le lit des rivières. Un ensemble de paramètres permet de faire varier la densité d'écume, de perturbation de l'eau (quantité de vagues) et la densité de rochers. Tous ces éléments sont générés sur différentes cartes, à l'aide du maillage de contrôle, et leurs valeurs dépendent du type des





**Figure 13:** Création du maillage de rendu à partir du maillage de contrôle. À gauche le maillage de contrôle segmenté. À droite les différentes cartes générées pour représenter les contacts, ainsi qu'un système de particules utilisé pour représenter les chutes libres.

chutes (figure 13). Par exemple, une queue-de-cheval a beaucoup d'écume mais pas de rochers, tandis qu'une rivière n'a pas d'écume et peu de rochers. Les quatre colonnes de droite du tableau 1 indiquent les valeurs que nous utilisons pour nos exemples. De plus, de l'écume et des rochers sont générés au pied des chutes.

**Représentation des chutes libres :** Une chute libre est représentée par un maillage créé par une extrusion partant du contour du maillage du bassin ou de la branche duquel il provient, et suivant la trajectoire de la chute. Ce maillage est subdivisé pour lui donner un aspect moins régulier. Au pied de la chute, nous simulons la brume provenant de l'éclaboussement de l'eau, à l'aide de particules semi-transparentes. En fonction du type de chute, nous générons en outre des particules au sommet de celle-ci qui vont tomber le long de la chute, pour améliorer l'apparence complexe de celle-ci (figure 13).

La seconde ligne de la figure 1 montre que nous parvenons ainsi à synthétiser de manière plausible chacun des éléments de notre classification.

### 7.3. Décorations procédurales

Une carte spéciale est utilisée pour générer des rochers dans les cours d'eau, ce qui est fait en fonction du type de chute. D'autres rochers ainsi que des arbres, de l'herbe et des plantes sont aussi générés sur le terrain. La distribution de ces éléments dépend de la pente du terrain, qui est calculée à partir du terrain déformé. Une *skybox* est utilisée pour représenter le ciel, et est reflétée par l'eau. Le soleil est représenté comme une lumière directionnelle et les ombres sont calculées à l'aide de *shadow maps*.

## 8. Résultats et discussion

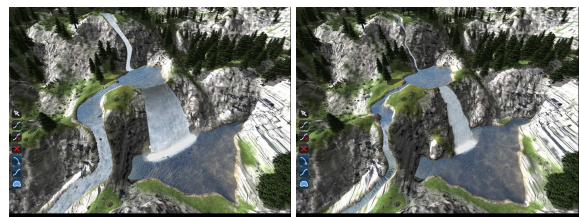
Le système est implémenté en C++ et utilise OpenGL et GLSL. Les calculs sont effectués sur un processeur graphique NVidia 660GTX et un processeur Intel Xeon, d'une fréquence de 3.20 GHz, et de 16 GB de mémoire.

Le système utilise deux processus : un processus CPU pour l'interface et une partie des calculs, et un processus de contrôle GPU pour les calculs coûteux de l'application.

Le total des calculs de chaque étape d'édition et de génération est toujours inférieur à une seconde, ce qui offre à l'utilisateur un retour visuel immédiat après chacune de ses actions.

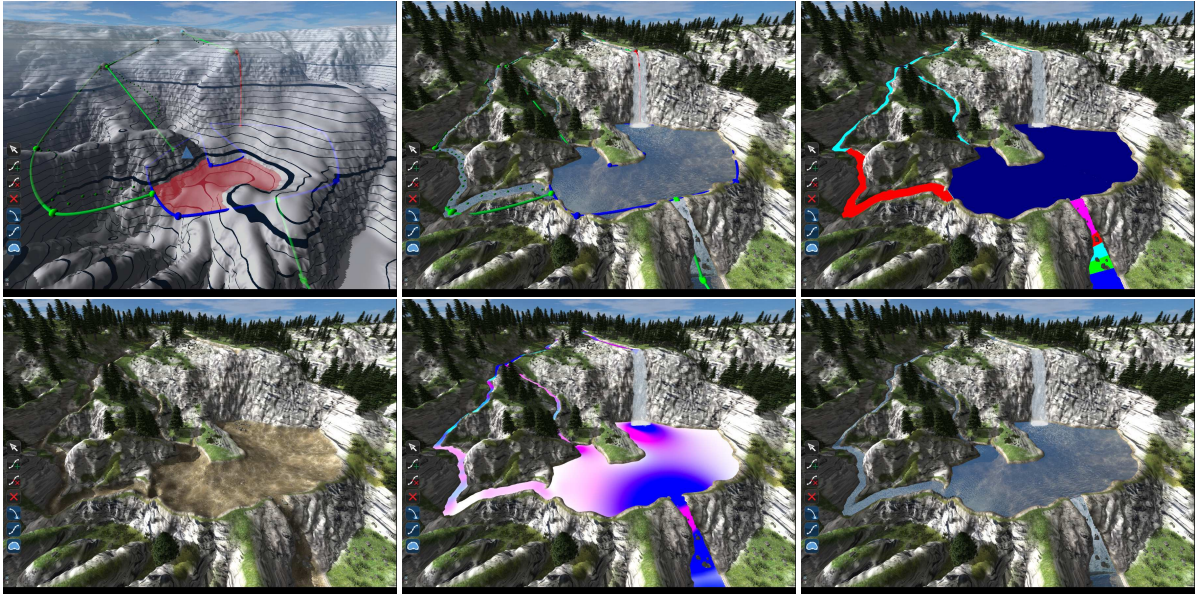
La figure 14 présente une vue d'ensemble du système en action, dont les différentes étapes sont décrites dans la légende de la figure. La vidéo accompagnant cet article donne une meilleure impression de notre système en action, et illustre un grand nombre de nos méthodes décrites dans les sections précédentes.

La figure 15 montre que le système procédural gère correctement les variations de débit, après que nous ayons réduit le débit du ruisseau en haut de l'image. Ses descendants dans le graphe sont ainsi affectés. En particulier, les types des éléments sortants sont automatiquement modifiés, i.e., de cascade à queue-de-cheval, et de plongeon à rideau.



**Figure 15:** Variation du débit dans le graphe. Le type des éléments est automatiquement changé, en conformité avec notre classification, et l'aspect visuel répond immédiatement à ces changements.

La figure 16 valide le fait que nous sommes capables, avec notre système, de reproduire en dix minutes un paysage donné par une photo réelle (sans compter le temps de conception de la carte d'élévations du terrain initial, non déformé par la cascade). Cela montre la capacité de contrôle



**Figure 14:** Vue d'ensemble du système. De haut en bas, de gauche à droite : Création d'un réseau de chutes. Subdivision. Détermination des types. Adaptation du terrain. Calcul des vitesses internes. Scène finale.



**Figure 16:** Le "Trou de Fer", sur l'île de la Réunion, est un joli exemple de chutes complexe. Gauche : La vraie chute, photo de © Serge Gélabert. Centre : Le résultat après dix minutes de modélisation en utilisant notre système procédural interactif, excluant le temps de création du terrain donné en entrée. La scène est générée à partir de 27 primitives en 2.4 secondes pour un terrain d'une résolution de  $2048 \times 2048$ . Droite : La vue des éléments du graphe utilisés pour créer la chute.

offerte à l'utilisateur, qui peut facilement obtenir le résultat désiré.

## 9. Conclusion

Nous avons présenté la première méthode de création procédurale interactive de conception de chutes d'eau complexes. Notre système s'appuie sur une collaboration étroite entre la génération automatique et le contrôle utilisateur, où les contraintes complexes et les tâches fastidieuses sont gérées par le modèle procédural, tandis que des outils d'édition intuitifs sont fournis à l'utilisateur. Cela mène à une expérience utilisateur enrichie et à un meilleur processus créatif.

Un grand nombre d'aspects de notre méthode sont dédiés

au cas particulier des chutes d'eau, leur catégorisation basée sur un diagramme pente-débit, ainsi que certains outils dédiés à leur conception interactive. Néanmoins, la méthodologie de conception de notre système, notamment notre façon de combiner contrôle haut niveau et des processus automatisés de maintien de la cohérence et de génération de détails, pourraient être généralisés à d'autres cas de modélisation de scènes naturelles, par exemple la sculpture de terrain ou la conception de forêts.

Il reste des problèmes à résoudre dans notre système actuel, qui pourraient faire l'objet de travaux futurs. Cela inclut une meilleure apparence des chutes et de la brume, et une intégration d'effets visuels plus réalistes. De plus,

une étude utilisateur comparant notre système avec les techniques de modélisation classiques ou avec la simulation physique permettrait d'encore mieux valider nos résultats.

## Remerciements

Ce travail a été en partie financé par une bourse Explo’Ra Doc attribuée par la Région Rhône Alpes, ainsi que par une bourse GRAND.

## Références

- [Bei06] BEISEL JR R. H.: *International Waterfall Classification System*. Outskirts Press, 2006.
- [BMV\*11] BERNHARDT A., MAXIMO A., VELHO L., HNAIDI H., CANI M.-P.: Real-time terrain modeling using CPU-GPU coupled computation. In *Proc. on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)* (2011), IEEE, pp. 64–71.
- [BN08] BRUNETON E., NEYRET F.: Real-time rendering and editing of vector-based terrains. *Computer Graphics Forum (Eurographics)*. Vol. 27, Num. 2 (2008), 311–320.
- [BSHK04] BHAT K., SEITZ S., HODGINS J., KHOSLA P.: Flow-based video synthesis and editing. *ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH)*. Vol. 23, Num. 3 (2004), 360–363.
- [BSW10] BAGAR F., SCHERZER D., WIMMER M.: A layered particle-based fluid model for real-time rendering of water. *Computer Graphics Forum (EGSR)*. Vol. 29, Num. 4 (2010), 1383–1389.
- [Car82] CARRECK R.: *The Family Encyclopedia of Natural History*. The Hamlyn Publishing Group, 1982.
- [DD06] DANIELSSON M., DANIELSSON K.: *Waterfall Lover’s Guide Northern California*. Mountaineers Books, 2006.
- [GCZ\*06] GUAN Y., CHEN W., ZOU L., ZHANG L., PENG Q.: Modeling and rendering of realistic waterfall scenes with dynamic texture sprites. *Computer Animation and Virtual Worlds*. Vol. 17, Num. 5 (2006), 573–583.
- [GGG\*13] GÉNEVAUX J.-D., GALIN E., GUÉRIN E., PEYTAVIE A., BENEŠ B.: Terrain generation using procedural models based on hydrology. *ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH)*. Vol. 32, Num. 4 (2013), 143:1–13.
- [GM01] GAMITO M. N., MUSGRAVE F. K.: Procedural landscapes with overhangs. In *10th Portuguese Computer Graphics Meeting* (2001), vol. 2.
- [HGA\*10] HNAIDI H., GUÉRIN E., AKKOUICHE S., PEYTAVIE A., GALIN E.: Feature based terrain generation using diffusion equation. *Computer Graphics Forum (Pacific Graphics)*. Vol. 29, Num. 7 (2010), 2179–2186.
- [HSB10] HENDRICKX Q., SMELIK R., BIDARRA R.: Real-time rendering of river networks. In *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. New York: ACM (2010), no. 22.
- [HW04] HOLMBERG N., WÜNSCHE B. C.: Efficient modeling and rendering of turbulent water over natural terrain. In *Proc. Intl. Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia* (2004), GRAPHITE, ACM, pp. 15–22.
- [LH04] LOSASSO F., HOPPE H.: Geometry clipmaps: terrain rendering using nested regular grids. *ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH)*. Vol. 23, Num. 3 (2004), 769–776.
- [PGGM09] PEYTAVIE A., GALIN E., GROSJEAN J., MERILLOU S.: Arches: a framework for modeling complex terrains. *Computer Graphics Forum (Eurographics)*. Vol. 28, Num. 2 (2009), 457–467.
- [SDKT\*09] SMELIK R., DE KRAKER K., TUTENEL T., BIDARRA R., GROENEWEGEN S.: A survey of procedural methods for terrain modelling. In *Proc. CASA Workshop on 3D Advanced Media In Gaming And Simulation (3AMIGAS)* (2009).
- [SDZ\*07] SAKAGUCHI R., DUFOR T., ZALZALA J., LAMBERT P., KAPLER A.: End of the world waterfall setup for “Pirates of the Caribbean 3”. In *ACM SIGGRAPH 2007 Sketches* (2007), ACM.
- [Sta99] STAM J.: Stable fluids. In *Proc. SIGGRAPH* (1999), pp. 121–128.
- [STdKB10] SMELIK R. M., TUTENEL T., DE KRAKER K. J., BIDARRA R.: Interactive creation of virtual worlds using procedural sketching. In *Proceedings of eurographics* (2010).
- [Teo09] TEOH S. T.: Riverland: an efficient procedural modeling system for creating realistic-looking terrains. In *Advances in Visual Computing*. Springer, 2009, pp. 468–479.
- [TGM13] TASSE F. P., GAIN J., MARAIS P.: Enhanced texture-based terrain synthesis on graphics hardware. *Computer Graphics Forum*. Vol. 31, Num. 6 (2013), 1959–1972.
- [TLL\*11] TALTON J. O., LOU Y., LESSER S., DUKE J., MĚCH R., KOLTUN V.: Metropolis procedural modeling. *ACM Trans. on Graphics*. Vol. 30, Num. 2 (2011), 11:1–14.
- [vH11] VAN HOESEL F.: Tiled directional flow. In *ACM SIGGRAPH 2011 Posters* (2011), p. 19:1.
- [YNBH09] YU Q., NEYRET F., BRUNETON E., HOLZSCHUCH N.: Scalable real-time animation of rivers. *Computer Graphics Forum (Eurographics)*. Vol. 28, Num. 2 (2009), 239–248.
- [YNS11] YU Q., NEYRET F., STEED A.: Feature-based

vector simulation of water waves. *Computer Animation and Virtual Worlds*. Vol. 22, Num. 2-3 (2011), 91–98.

[ZIH\*11] ZHU B., IWATA M., HARAGUCHI R., ASHIHARA T., UMETANI N., IGARASHI T., NAKAZAWA K.: Sketch-based dynamic illustration of fluid systems. *ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH Asia)*. Vol. 30, Num. 6 (2011), 134:1–8.