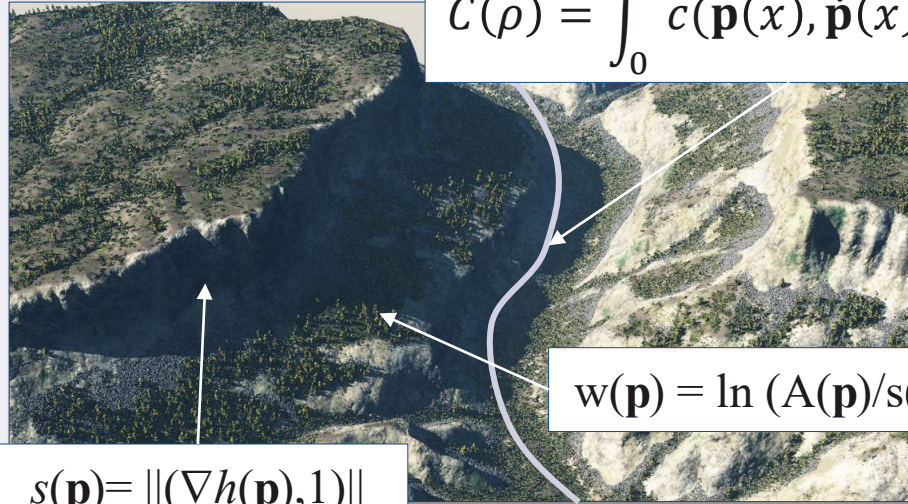


Digital World Modeling

From mathematics ...

$$C(\rho) = \int_0^1 c(\mathbf{p}(x), \dot{\mathbf{p}}(x), \ddot{\mathbf{p}}(x)) dx$$



$$s(\mathbf{p}) = \|(\nabla h(\mathbf{p}), 1)\|$$

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

... to the screen

E. Galin
Université Lyon 1

Digital World Modeling

Data Structures

Procedural Modeling

Erosion Simulation

Procedural Road Generation

Vegetation and Ecosystems

Growth models

Aging and weathering

Contexte et motivation

Overview

Small scale erosion

Tectonics

Coupling

Objectif

Outils pour **contrôler** et **automatiser** la création d'**univers virtuels réalistes**



Verrous scientifiques et techniques

Variété et **nombre élevé** d'objets à modéliser

Scènes de **très grande taille** avec des **détails** : **variations d'échelle**

Objets **interagissant**, vieillissement, variation d'apparence



eric.galin@liris.cnrs.fr

<http://liris.cnrs.fr/~egalin>



Erosion

Impacts de foudre

Eboulements

Stabilisation par la végétation

Influence température

Eclaircissement

Destruction de la végétation

Conquête sur zone d'accrétion

Ruissèlement

Erosion et transport matière minérale et organique

Rétention d'eau par la végétation

Boucle d'interaction
Modèles **multi matériaux** permettant de gérer les **interfaces**

Simulation d'érosion

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Classification

L'érosion **thermique** : matériaux granulaires se détachent des pentes fortes et se stabilisent en fonction de l'angle au repos du matériau

L'érosion **hydraulique** simule le détachement et le transport par l'eau (pluie, rivières)

L'érosion **éolienne** peut sculpter par abrasion et transporter les matériaux granulaires



Courtesy of David Guegain, 2012 (Vue 10 Eon-software + World Machine)

Les techniques d'érosion ne prennent pas en compte **la végétation**



eric.galin@liris.cnrs.fr

<http://liris.cnrs.fr/~egalain>

Simulation d'écosystèmes

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Classification

Distribution de la végétation en fonction des **paramètres** du terrain (pente, orientation)
Simulation de la **compétition** (asymétrique) inter-espèces



Sanctuary by Drea Horvath

Pas de prise en compte de l'**influence** de la végétation : érosion du terrain, **mort** des espèces végétales, production de **matière organique** non modélisée



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Small Scale Terrain Erosion





Thermal erosion

Overview

Small scale erosion

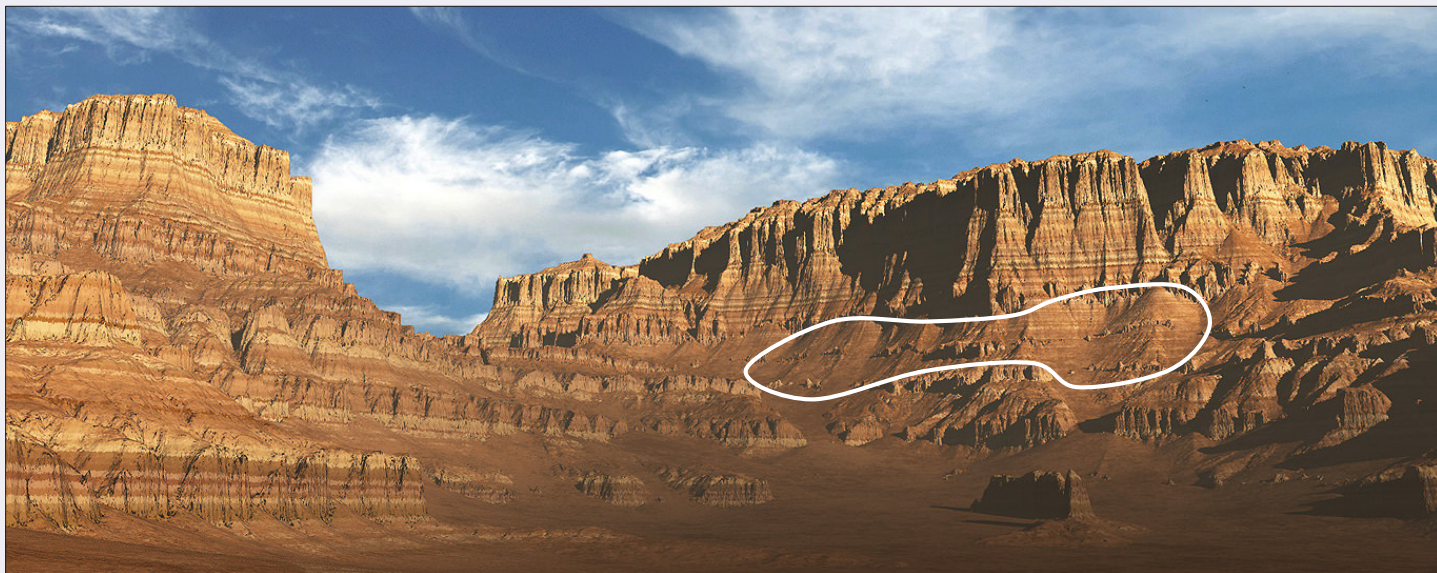
Tectonics

Coupling

Definition

Every phenomenon **complementary** to hydraulic erosion [Kelley1988]
Stabilization of granular material, parametrization by talus angle θ

$$\partial h(\mathbf{p}, t) / \partial t = -k(s(\mathbf{p}) - \tan \theta) \text{ if } s(\mathbf{p}) > \tan \theta$$



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalain>

Thermal erosion

Overview

Small scale erosion

Tectonics

Coupling

Detachment

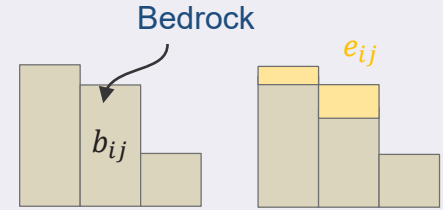
Convert part of the bedrock into granular material [Kelley1989]

For all cells C_{ij}

Convert part e_{ij} of b_{ij} into g_{ij}

$$b_{ij}(t+1) \leftarrow b_{ij}(t) - e_{ij} \text{ and } g_{ij}(t+1) \leftarrow g_{ij}(t) + e_{ij}$$

Function of slope s_{ij} , or accessibility α_{ij}



Stabilization

Stabilization moves eroded material to lower cells by gravity [Kelley1989]

$$\partial h(\mathbf{p}, t) / \partial t = -k(s(\mathbf{p}) - \tan \theta) \text{ if } s(\mathbf{p}) > \tan \theta$$

Initialize stack of unstable cells $U = \{C_{ij}\}$

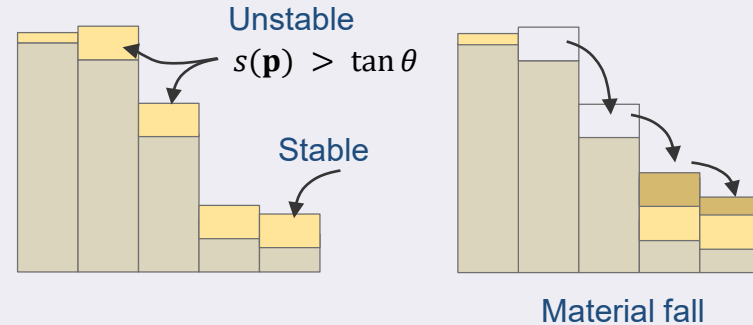
While $U \neq \emptyset$

Select cell C_{ij} from U

Move ε from C_{ij} to lower neighbors $L(C_{ij})$

Add neighbors $L(C_{ij})$ to U

Which fraction of ε ?



A. Kelley, M. Malin, G. Nielson. Terrain simulation using a model of stream erosion. *Computer Graphics* 22(4), 1988, 263-268.



eric.galin@liris.cnrs.fr

http://liris.cnrs.fr/~egalain

Thermal erosion

Overview

Small scale erosion

Tectonics

Coupling

Lower neighbors

$L(C_{ij}) = \{C_k\}$ represent cells C_k within the domain Ω in the one-ring of C_{ij} with a lower elevation

$$L(C_{ij}) = \Omega \cap \{C_{i+x, j+y}, h(i+x, j+y) < h(i, j)\} \text{ where } (x, y) \in \{-1, 0, 1\}^2$$

Diffusion function of the relative slope of lower cells

$$\varepsilon_k = \varepsilon (s_k)^n / \sum_i (s_i)^n$$

Fraction of material

Slope to the k-th lower cell

Sum of slopes

Exponent

Diffusive model with $n = 1$, steepest with $n \rightarrow \infty$

Exponent will be set to $n \approx 4 - 6$ for fluid simulation



Material stacks

Generalization to material stacks models [Peytavie2009]

Peytavie et al. Arches: a framework for modeling complex terrains. *Computer Graphics Forum*, 28, 2, 2009



eric.galin@liris.cnrs.fr

<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Hydraulic erosion

Overview

Small scale erosion

Tectonics

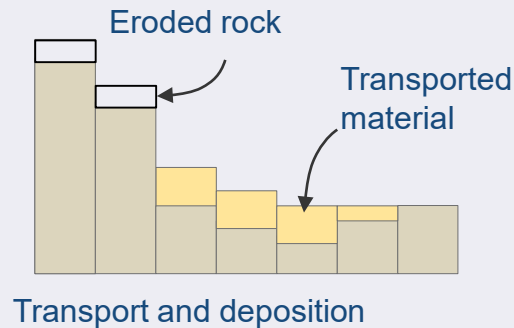
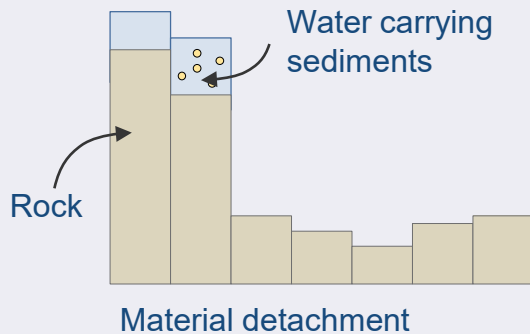
Coupling

Hypotheses

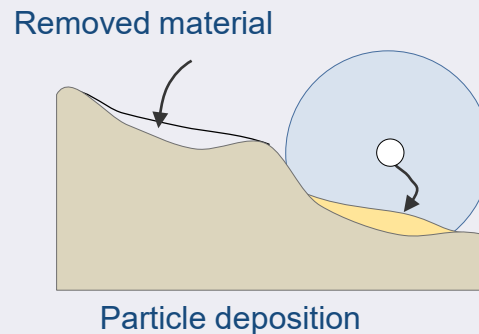
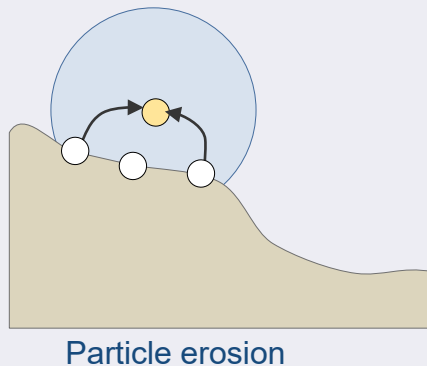
Fluid simulation coupled with sediment transport
Navier-Stokes Equations

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p = g \nu \nabla \cdot \nabla \mathbf{u}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Eulerian
Shallow water
equations

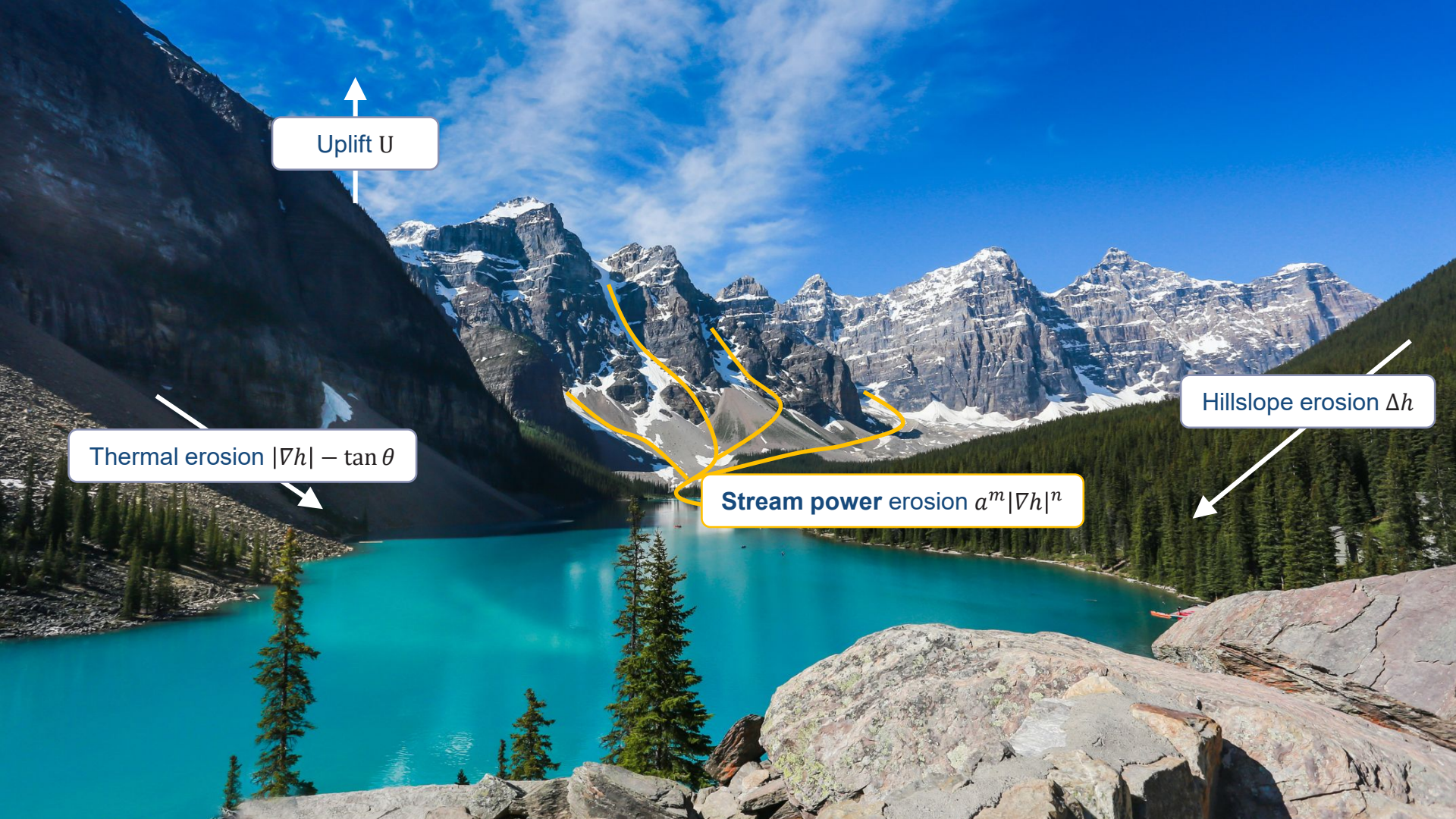


Lagrangian
Smooth Particles
Hydrodynamics



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Large Scale Terrain Erosion



Uplift U

Thermal erosion $|\nabla h| - \tan \theta$

Stream power erosion $a^m |\nabla h|^n$

Hillslope erosion Δh

Large scale stream power erosion

Overview

Small scale erosion

Tectonics

Coupling

Model

Large-scale **mountain ranges** based on geologically inspired incision model

Uplift from geomorphology combined with different erosion models [Cordonnier2016]

$$\frac{\partial h(\mathbf{p}, t)}{\partial t} = u(\mathbf{p}) - a^m(\mathbf{p})s^n(\mathbf{p}) - (s(\mathbf{p}) - \tan \theta) - \Delta h(\mathbf{p})$$

Uplift Stream power erosion Debris slope erosion Hill slope erosion



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

G. Cordonnier, J. Braun, M.-P. Cani, B. Benes, E. Galin, A. Peytavie, E Guérin, Large scale terrain generation from tectonic uplift and fluvial erosion. *Computer Graphics Forum* **35** (2), 2016, 165–175.

Large scale stream power erosion

Overview

Small scale erosion

Tectonics

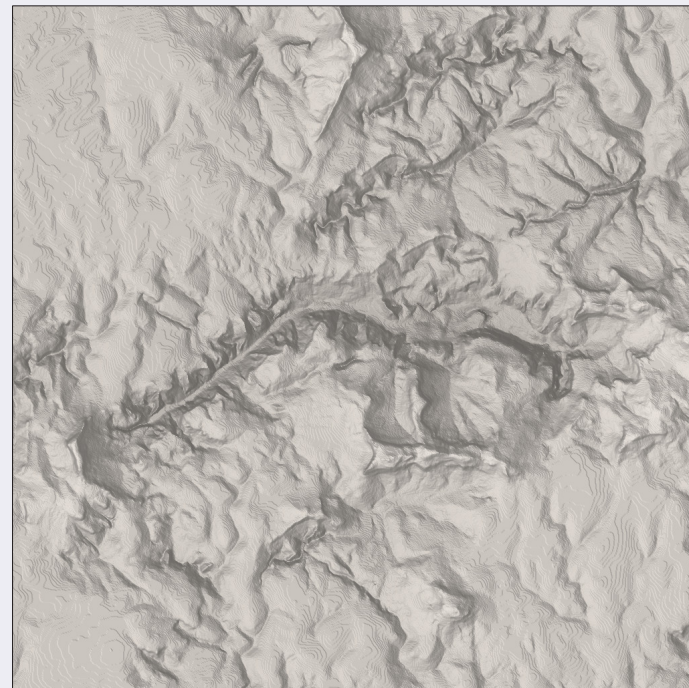
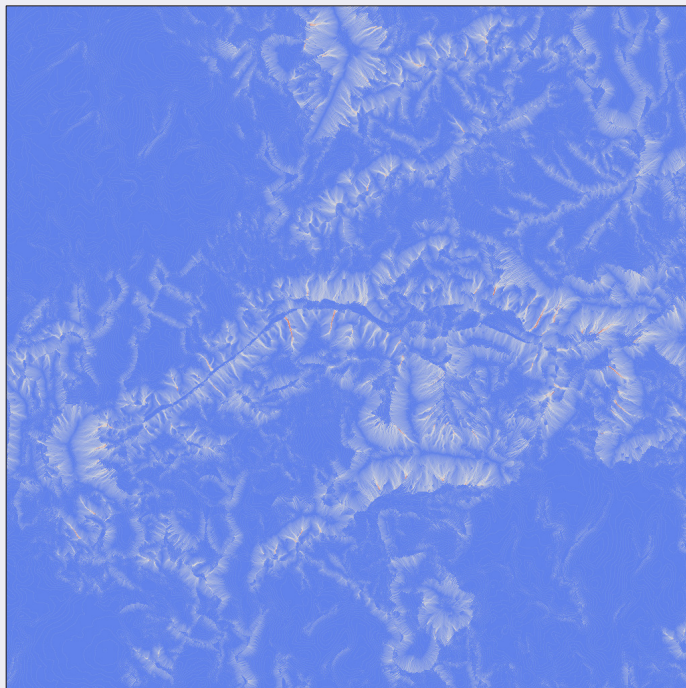
Coupling

Drainage and slope

Slope is easy to compute $O(n^2)$

Drainage algorithm $O(n^2 \ln n)$

$$s(\mathbf{p}) = |\nabla h|$$



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Overview

Small scale erosion

Tectonics

Coupling

```
ScalarField2 HeightField::StreamArea() const
{
    ScalarField2 stream(Box2(a, b), nx, ny, 1.0);

    QVector<ScalarPoint2> queue = GetScalarPoints();
    std::sort(queue.begin(), queue.end());

    for (int i = queue.size() - 1; i >= 0; i--)
    {
        QPoint p = queue.at(i).Point();

        FlowStruct flow;
        int n = CheckFlowSlope(p, flow);
        if (n > 0)
        {
            const double sp = stream(p);
            for (int j = 0; j < n; j++)
            {
                stream(flow.q[j]) += sp * flow.sn[j];
            }
        }
    }

    return stream;
}
```



eric.galin@liris.cnrs.fr

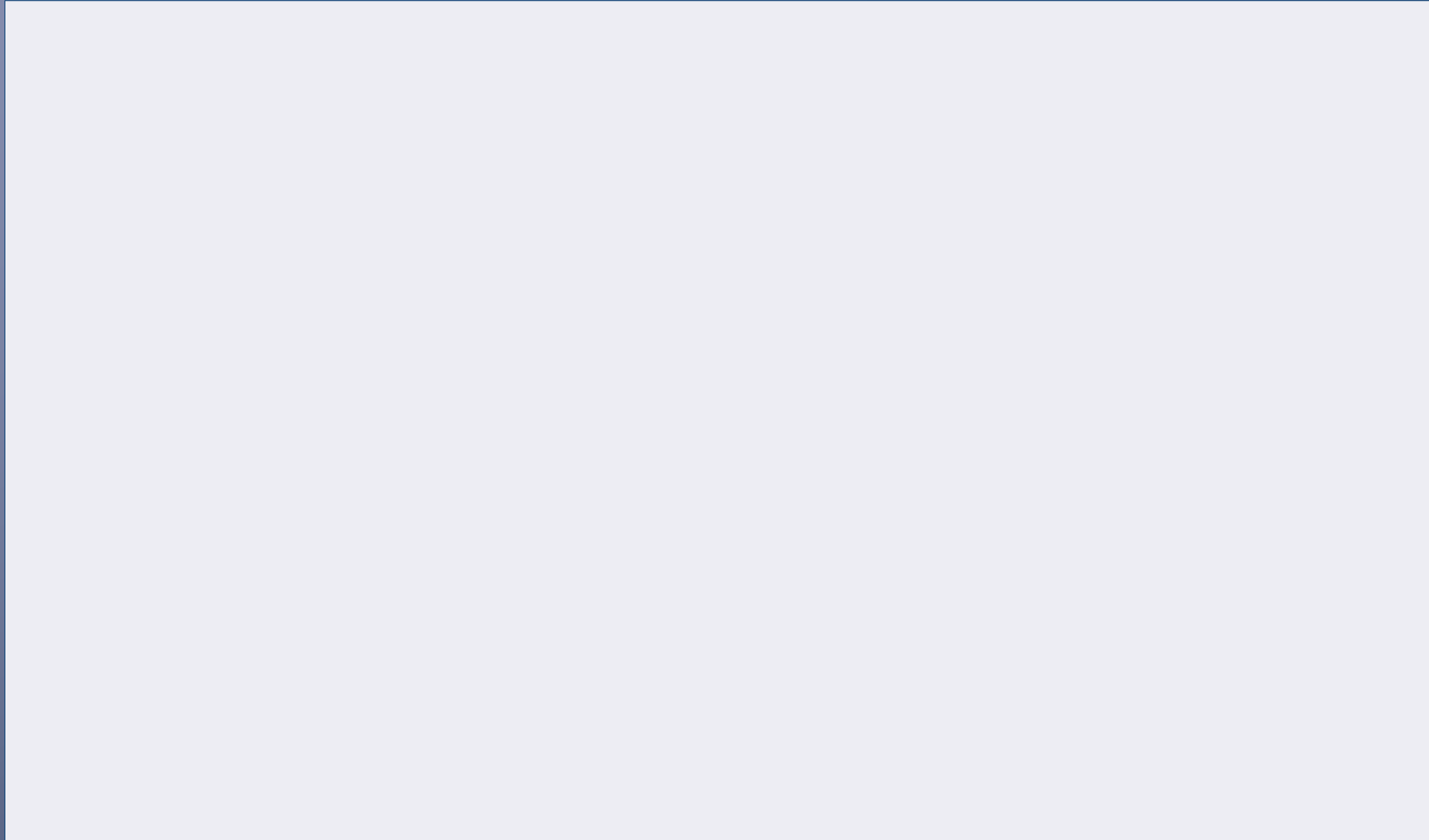
<http://liris.cnrs.fr/~egaline>

Overview

Small scale erosion

Tectonics

Coupling



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Combining Ecosystem Simulation and Terrain Erosion

Constat

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Limites du processus de génération traditionnel

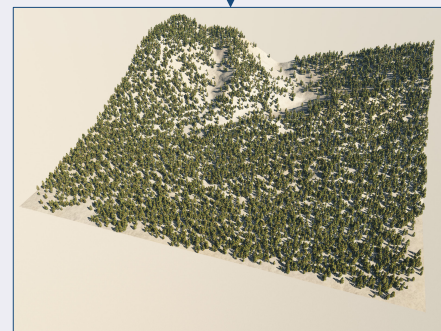
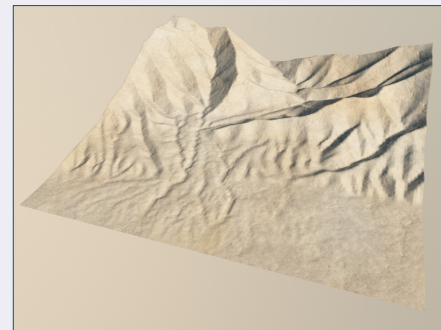
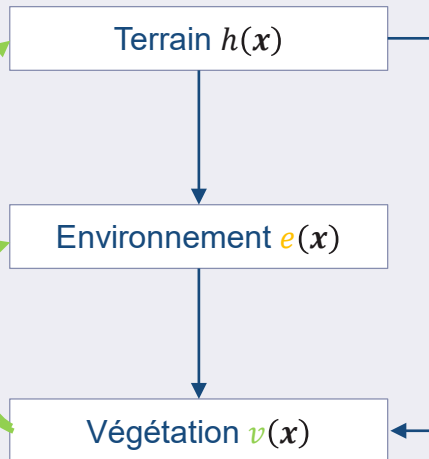
Génération du terrain $h(x)$

Calcul des paramètres de l'environnement $e(x)$

Simulation d'écosystème $v(x)$

La **décomposition** de la végétation en **couches** de matière **organique**, la végétation peut **fissurer** la roche, **retenir** le sable ...

Influence de la **végétation** sur l'ombre, l'humidité, le vent



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

G. Cordonnier, E. Galin, J. Gain, B. Benes, E. Guerin, A. Peytavie, M.-P. Cani. Authoring Landscapes by Combining Ecosystem and Terrain Erosion Simulation. *Proceedings of SIGGRAPH*, 2017

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Analyse

Différentes équations d'évolution de
Pour le terrain h

Hillslope equation

$$\frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial h}{\partial x}$$

Stream power equation

$$\frac{\partial h}{\partial t} = k \sqrt{A} \frac{dh}{dx}$$

Equations différentielles multi variables couplées
Elevation $h(x, t)$, végétation $v(x, t)$, sédiments $s(x, t)$

Equations non linéaires

Schéma d'Euler

Problèmes de stabilité

Résolution des équations différentielles complexe

Evènements interdépendants avec conditions de **déclenchement**
Résolution par méthode **stochastique**



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Contributions

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Données et fonctions

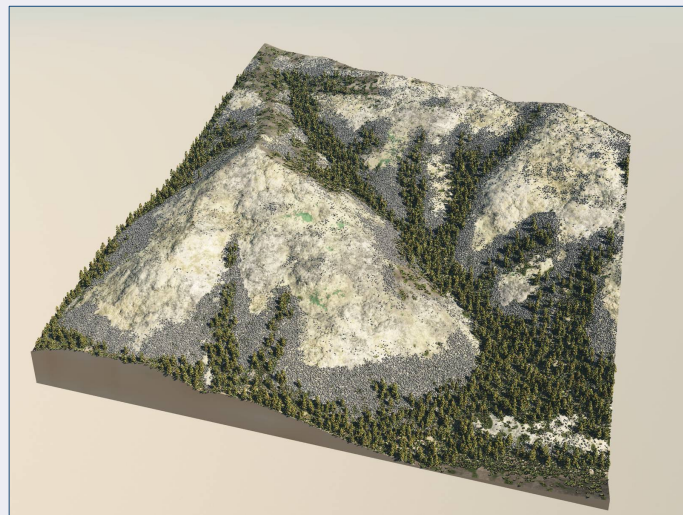
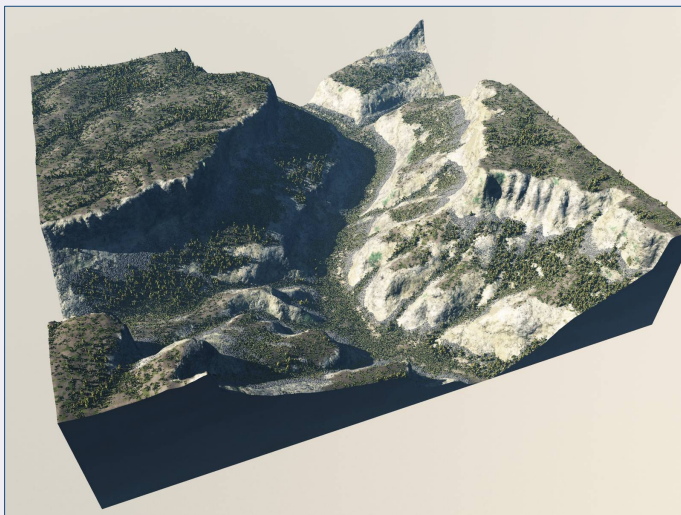
Systeme

Données

Représentation de terrains **multi matériaux**
par couches de matière
Différentes couches représentant la **densité de végétation** pour des variétés d'espèces

Simulation

Modèle à base d'évènements **stochastiques**
Interaction entre des phénomènes naturels différents : éolien, hydraulique, thermique ...
Contrôle direct et indirect



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalain>

Modèle

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Structure

Grille régulière multi matériaux

Echelle **spatiale** : cellules de $10 \times 10 \text{ m}^2$; et terrains de $10 \times 10 \text{ km}^2$

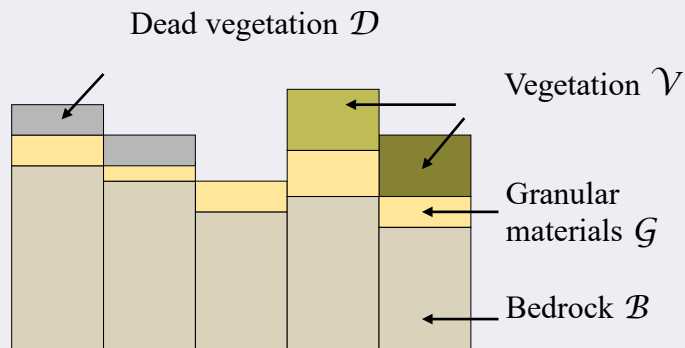
Echelle **temporelle** : période de 100 – 1000 y par pas de 1 y

Matériaux

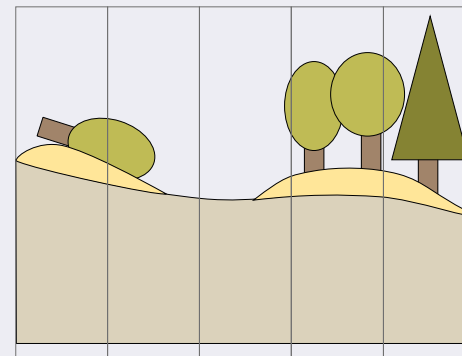
Terrain : matériaux granulaires $G(x, t)$ et roche $B(x, t)$

Végétation : une densité $V(x, t)$ par type et plantes mortes $D(x, t)$

Eau : liquide $W(x, t)$



Discrete layered representation



Instantiated ground and models from layer data



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Architecture

Overview

Small scale erosion

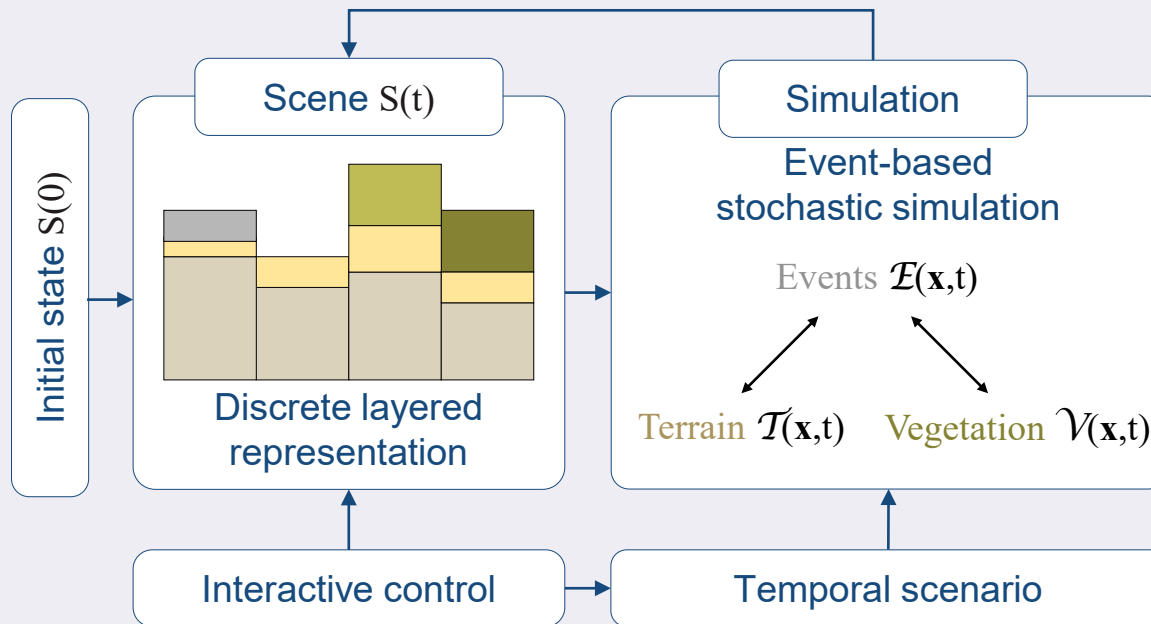
Large scale

Coupling

Simulation

Evènements pouvant **déclencher** d'autres évènements en **cascade**

Contrôle par **interaction** directe, ou par **scénario temporel**



eric.galin@liris.cnrs.fr

<http://liris.cnrs.fr/~egalain>

Evènements

Overview

Small scale erosion

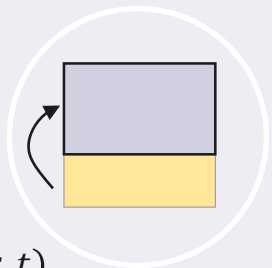
Large scale

Coupling

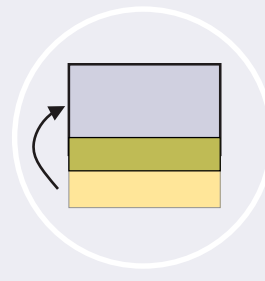
Erosion hydraulique

Arrachement sur fortes pentes, transport, dépôt favorisé sur faibles pentes

La présence de **végétation limite l'arrachement** et **favorise le dépôt**

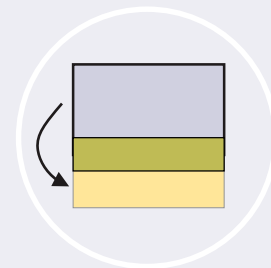


Erosion $e(x, t)$



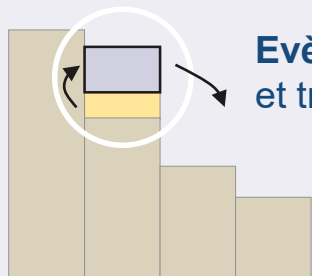
Erosion

$$e(x, v(x, t), t) < e(x, t)$$

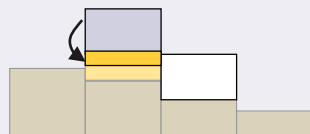


Dépôt

$$f(x, v(x, t), t) > f(x, t)$$

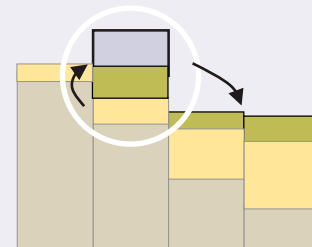


Evènement : propagation et transport

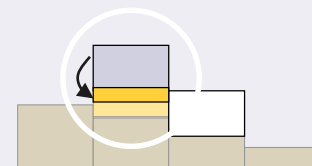


Arrachement
 $S \rightarrow S$ et $B \rightarrow S$

Dépôt



Arrachement **limité**



Dépôt **augmenté**



eric.galin@liris.cnrs.fr

http://liris.cnrs.fr/~egalin

Validation

Overview

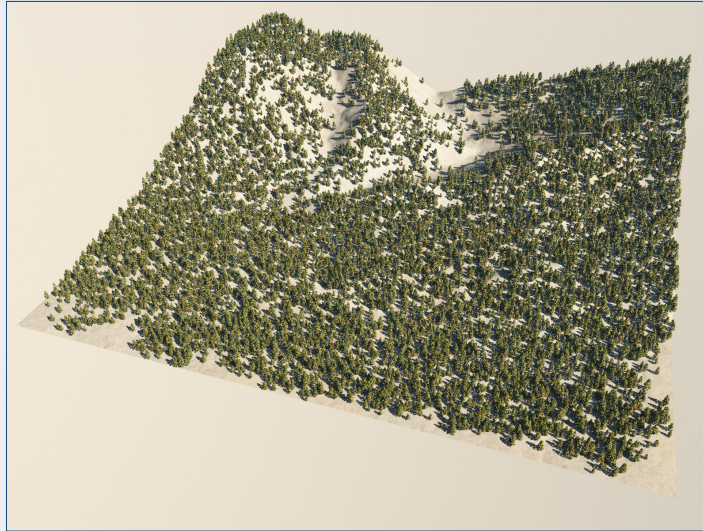
Small scale erosion

Large scale

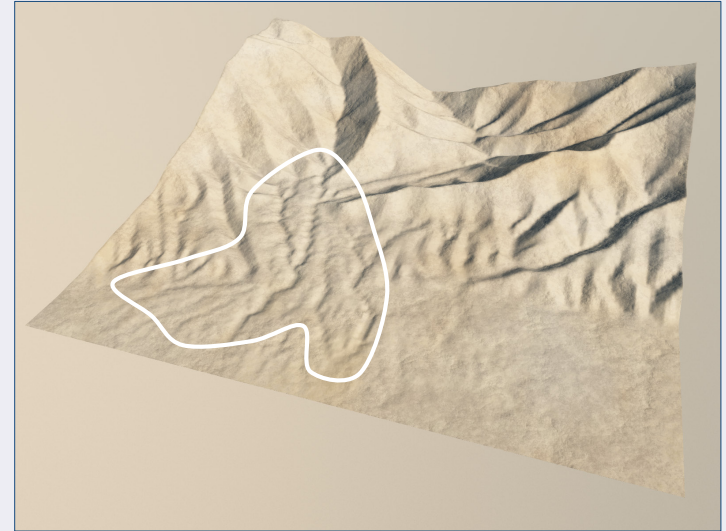
Coupling

Effet protecteur de la végétation

Les arbres limitent l'intensité de l'érosion hydraulique



Terrain protégé par la végétation



Terrain nu

Overview

Small scale erosion

Large scale

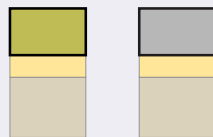
Coupling

Impacts de foudre

Fragmentation de la roche et projection dans le voisinage

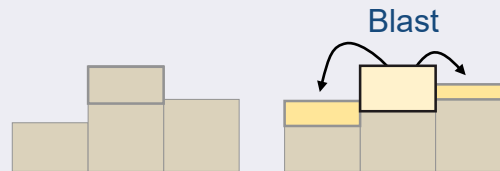
Destruction de la végétation, **déclenchement** d'un évènement de type feu

Impact sur la végétation



Destruction
 $\mathcal{V} \rightarrow \mathcal{D}$

Impact sur la roche



Roche fragmentée en rochers
 $\mathcal{B} \rightarrow \mathcal{G}$

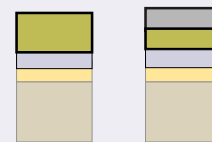
Feu

Destruction de la végétation et **propagation** aux voisinage selon l'humidité

Certaines espèces ne provoquent de germination qu'après incendie



Destruction
 $\mathcal{V} \rightarrow \mathcal{D}$



Destruction limitée et extinction
 $\mathcal{V} \rightarrow \mathcal{D}$

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Feu

Les impacts de **foudre**, ou les **incendies** détruisent la végétation
Propagation limitée par l'**humidité**



Effets complexes

Overview

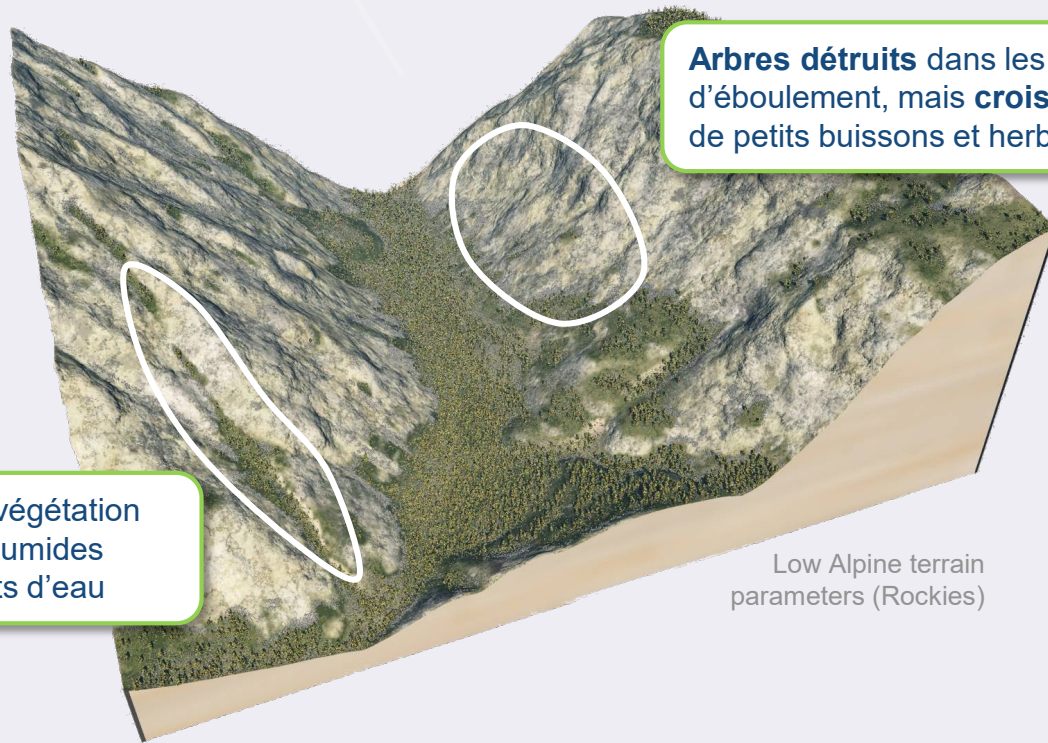
Small scale erosion

Large scale

Coupling

Végétation

Croissance et **conquête** de végétation résistante (buissons, jeunes arbres)
Stabilisation des régions d'accrétion



Arbres détruits dans les zones d'éboulement, mais **croissance** de petits buissons et herbe

Développement de végétation dans les zones humides avec écoulements d'eau

Low Alpine terrain parameters (Rockies)



eric.galin@liris.cnrs.fr

<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Effets complexes

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Végétation

Croissance et **conquête** de végétation résistante (buissons, jeunes arbres)

Stabilisation des régions d'accrétion



Grand Canyon (USA)

Compétition entre les
éboulements et le développement
de la végétation



eric.galin@liris.cnrs.fr

<http://liris.cnrs.fr/~egalain>

Effets complexes

Overview

Small scale erosion

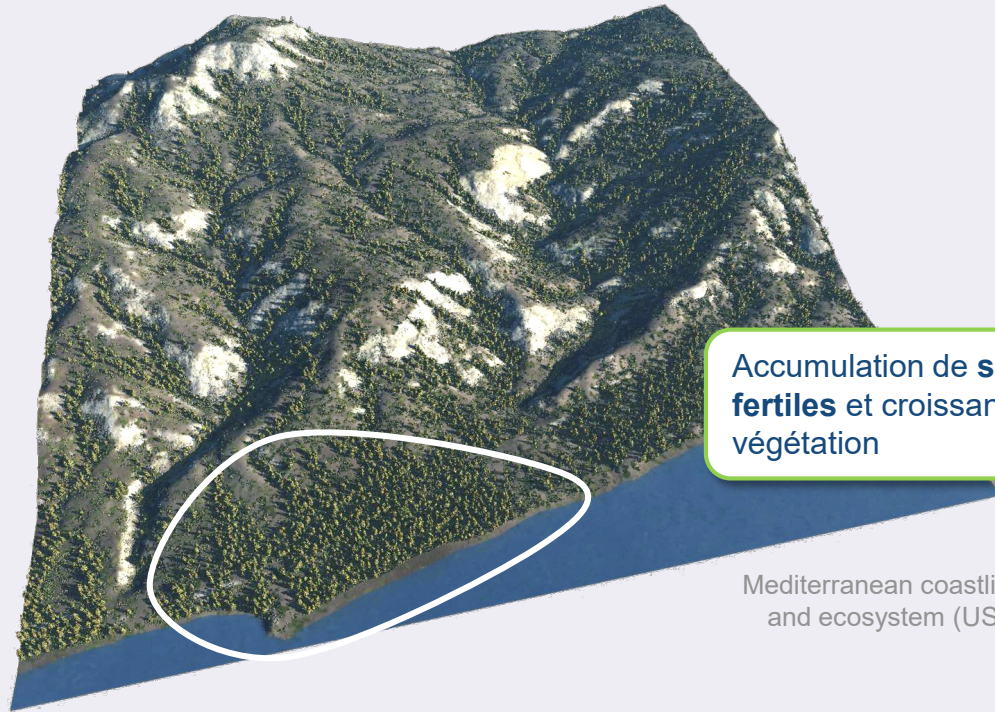
Large scale

Coupling

Erosion

Conquête de terrain sur la mer suite à l'érosion des montagnes

Développement de la végétation sur les sédiments accumulés



Accumulation de **sédiments fertiles** et croissance de la végétation

Mediterranean coastline and ecosystem (USA)



eric.galin@liris.cnrs.fr

<http://liris.cnrs.fr/~egaline>

Effets complexes

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Végétation

Croissance et formation de bosquets sur les zones fertiles avec régénération des sols



Zones fertiles obtenues par la décomposition en humus de la végétation morte

Mediterranean ecosystem



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Temps

Terrain de $1 \times 1 \text{ km}^2$, discrétisation 128×128 , édition interactive 0,1s
Coût en $O(n^4)$ où n représente la discrétisation, 10s pour 1024×1024

Processus locaux (foudre, glissements de terrains, écosystème) **efficaces** :

$$O(k^2 n^2) \text{ où } k \ll n$$

Erosion hydraulique : transport de sur des longues distances **couteux** :

$$O(k^2 n^2) \text{ avec } k \sim n \text{ donc } O(n^4)$$

Erosion hydraulique : transport de sur des

Eboulements et tas de rochers

Compétition inter espèces

longues distances **couteux** :

$$O(k^2 n^2) \text{ avec } k \sim n \text{ donc } O(n^4)$$

Trajectoire d'une goutte d'eau

Grand Canyon (USA)



eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalin>

Conclusion

Overview

Small scale erosion

Large scale

Coupling

Modélisation de paysages

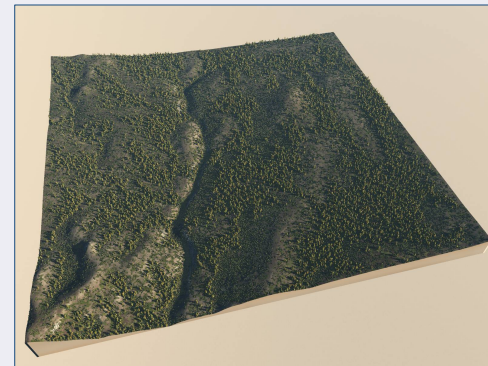
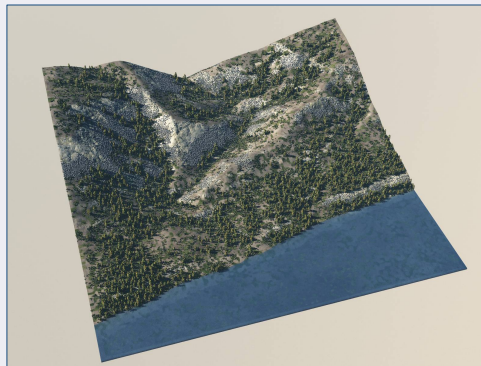
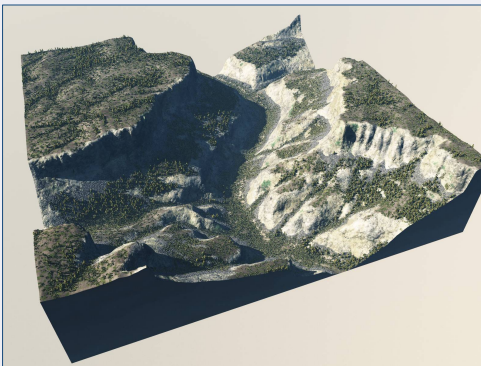
Méthode de simulation permettant de reproduire et de générer des nombreux phénomènes émergents complexes issus de l'**interaction terrain végétation**

Evolution au cours du temps (scénarii climatiques)

Méthode **stochastique** combinant différents évènements élémentaires


Simulation de phénomènes complexes avec **inter influence** terrain - végétation

Phénomènes variés : érosion thermique, hydraulique, décomposition de la végétation



A Review of Digital Terrain Modeling

Conclusion



We wanted the highest mountain to flow all the way down to the bottom jungle, all across the world. It was a massive simulation. **It was not possible to compute such a big terrain at this resolution (64k x 64k) on one computer.** [...]

We requested some additional dev to Stephen Schmitt, author of the World Machine. [...] We ended [...] **throwing a computation every 3 days across 80 computers.**

As the tiles have limited access to each other for cost reasons, the other challenge was to have a consistent erosion across different machines. To solve this we pre render the big eroded land mass in one machine at a lower resolution, then distribute micro erosion and other costly details on the render farm using the Tile system. It fixes 90% of the tile joint.