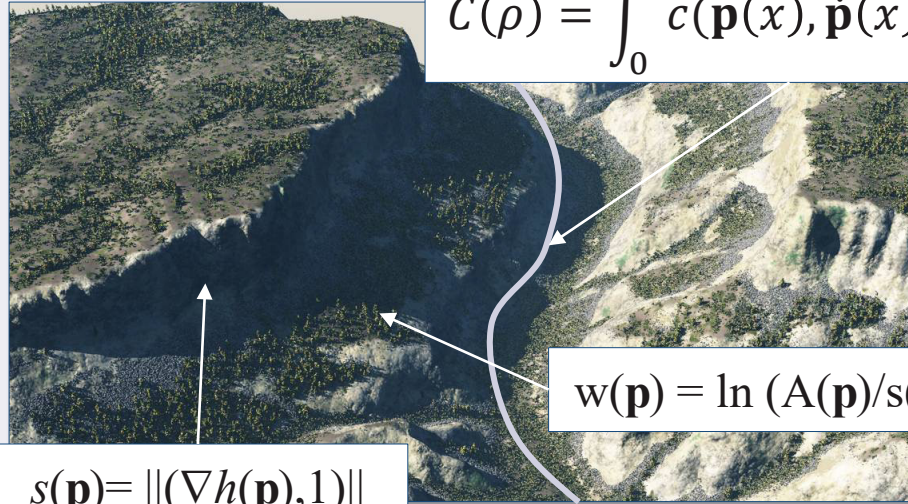


Digital World Modeling

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

Génération procédurale de routes

Overview

Roads

Road networks

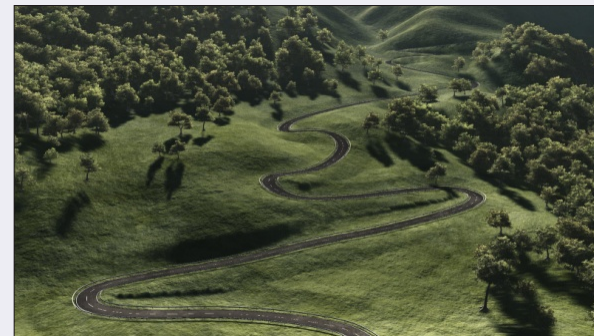
Challenge : Génération de **différents types** de routes dont la **trajectoire** s'adapte au relief du terrain, avec des **détails** comme les terrassements et les comblements

Proposition

Génération d'un **squelette de trajectoire**

Plus court chemin

Fonction de cout anisotrope

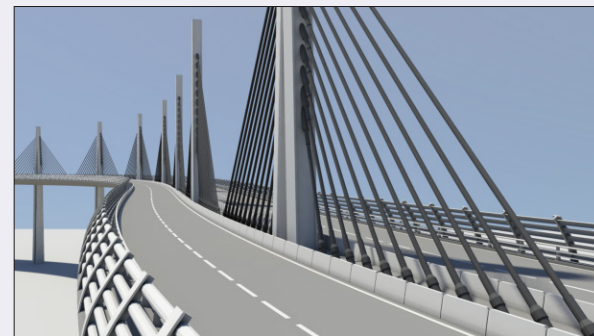


Proposition

Génération procédurale de la géométrie

Modèles géométriques paramétrés

Adaptés à l'environnement



eric.galin@liris.cnrs.fr

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

Terrassement du terrain et génération de la géométrie

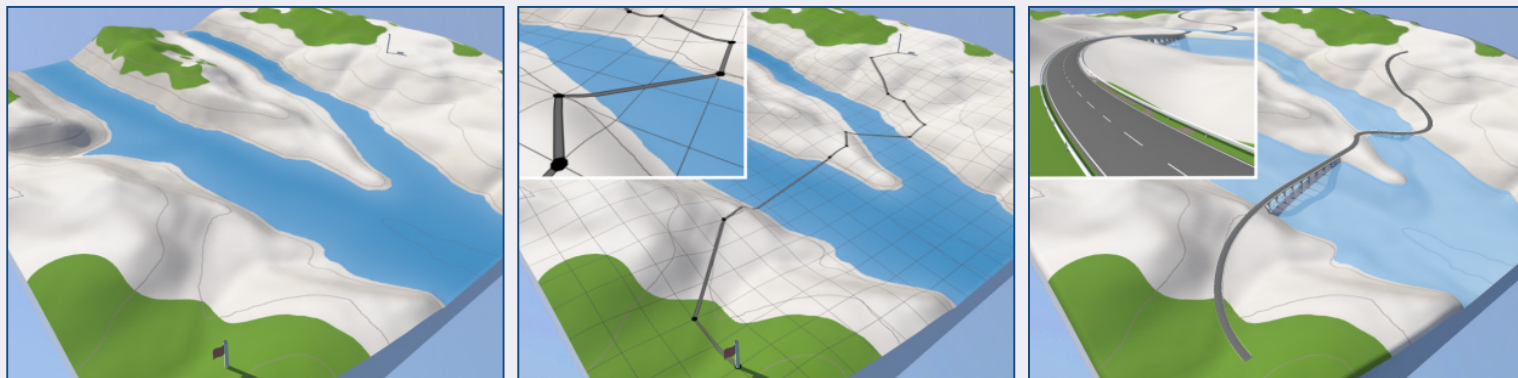
Overview

Roads

Road networks

Geometry

From trajectory to mesh



Université Claude Bernard  Lyon 1

eric.galin@liris.cnrs.fr

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

Roads : Trajectory Computation

Recherche de la trajectoire

Overview

Roads

Road networks

Problème

Plus court chemin ρ entre deux points \mathbf{a} et \mathbf{b} minimisant un coût anisotrope c [Galin2010]

Le chemin solution ρ^* minimise la fonctionnelle $C(\rho^*) = \min_{\rho \in P} C(\rho)$

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

Position

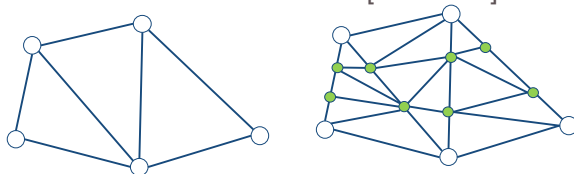
Vitesse

Accélération

Solution discrète

Echantillonnage de l'espace de recherche et utilisation de masques de déplacement

Recherche sur un **maillage** avec insertion de points de **Steiner** coûteuses [AMS2005]



Maillage **régulier augmenté** pour prendre en compte les directions [Galin2010]



eric.galin@liris.cnrs.fr

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

E. Galin, A. Peytavie, N. Maréchal, E. Guérin. Procedural Generation of Roads. *Computer Graphics Forum*, 29(2), 2010.

Masques de segments

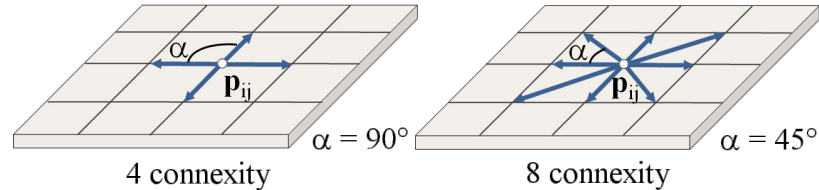
Overview

Roads

Road networks

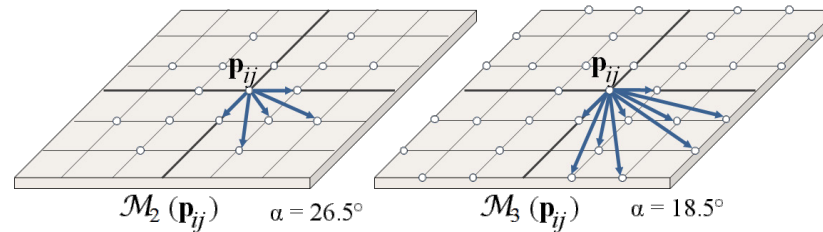
Problem

Angle resolution is either 90° or 45° when considering the 1-neighborhood



Segment mask

Use of masks with a larger neighborhood
Store the connectivity between points with generic masks



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

Contrôle de la courbure

Overview

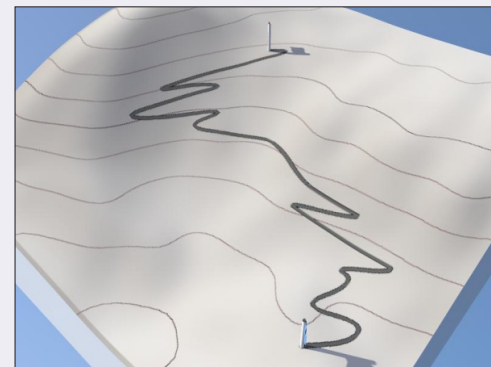
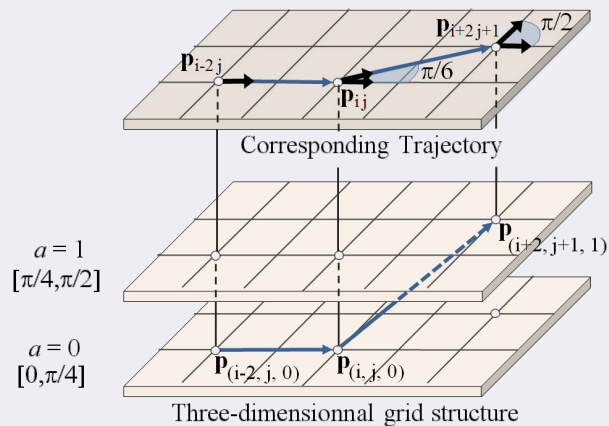
Roads

Road networks

Courbure

Ajout d'une dimension à l'espace de recherche

Discrétisation des courbures (angles) en m intervalles



Model	Cost	Time
Without	64 693	0,1
With	60 676	1,9



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

Construction d'une fonction de cout

Overview

Roads

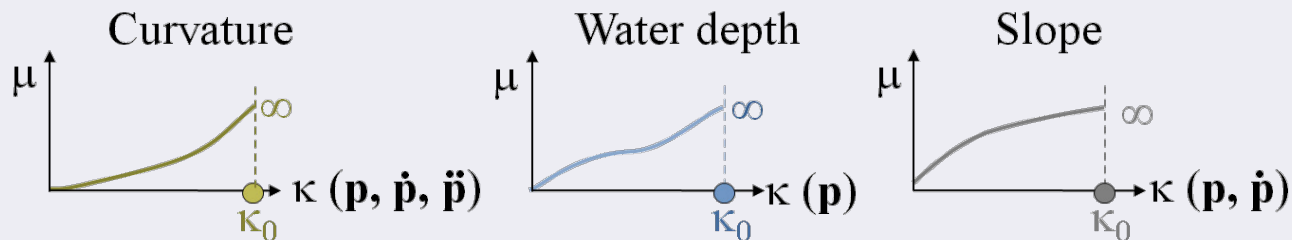
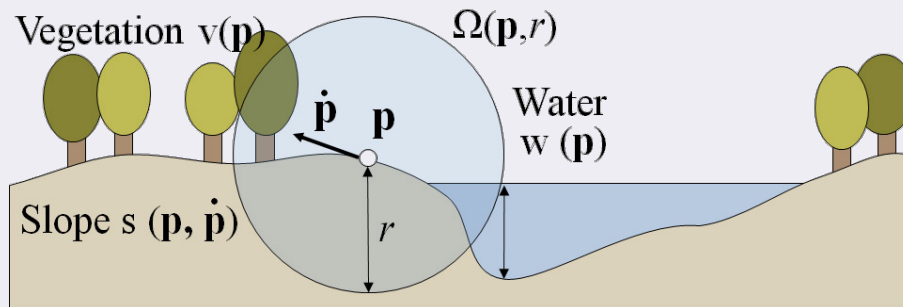
Road networks

Critères

Fonction permettant le calcul et le contrôle des trajectoires

$$c(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{p}}) = \sum_i \mu_i \circ \kappa_i(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{p}})$$

Fonction de transfert Caractéristiques



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

Généralisation

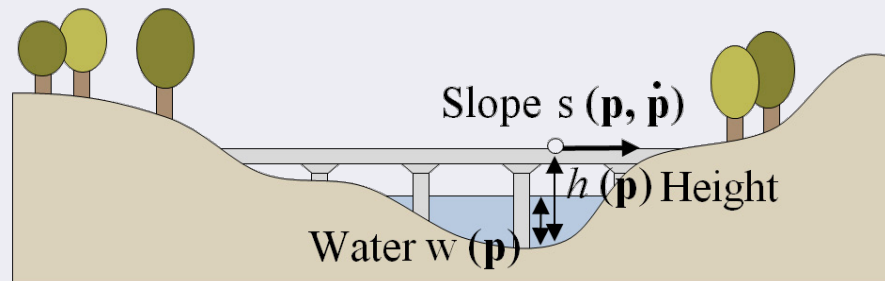
Calcul du coût pour une trajectoire souterraine ou aérienne

Pont

Hauteur $h(\mathbf{p})$

Pente $s(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$, profondeur d'eau $w(\mathbf{p})$

Courbure $\gamma(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{p}})$

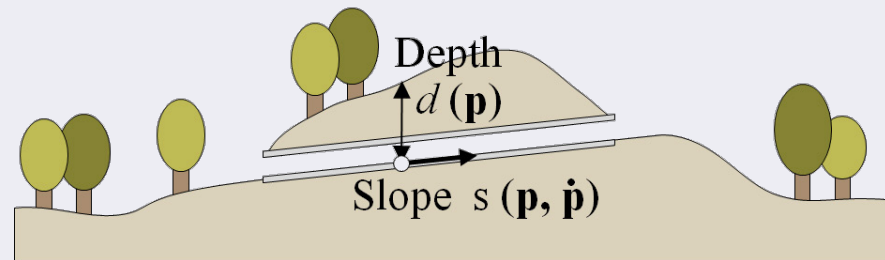


Tunnel

Profondeur $d(\mathbf{p})$

Pente $s(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$

Courbure $\gamma(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{p}})$



Influence de l'espace de recherche

Overview

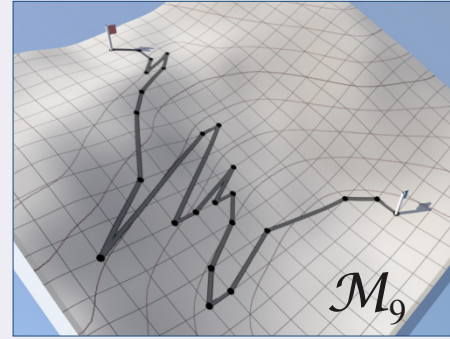
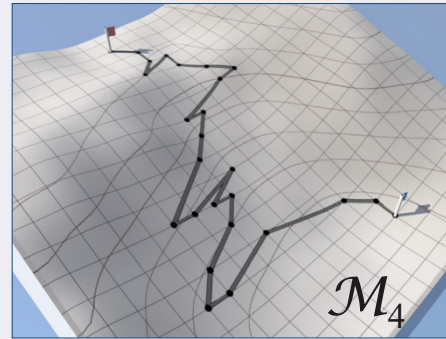
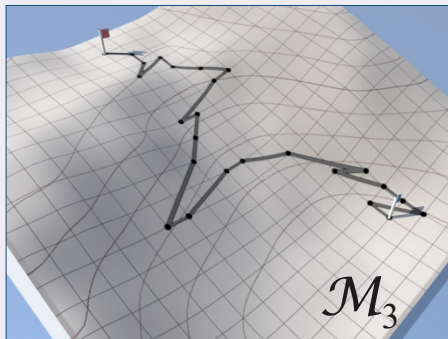
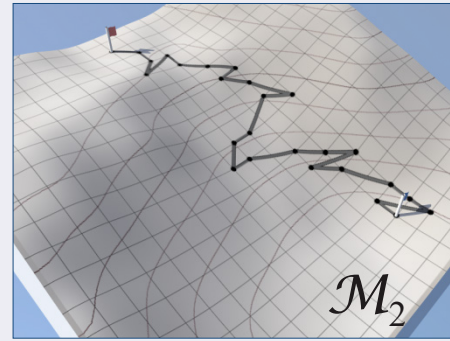
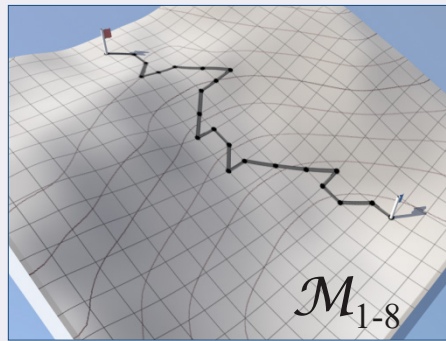
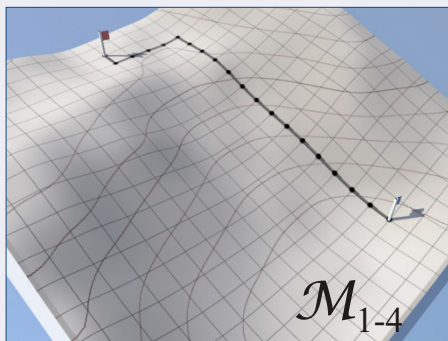
Roads

Road networks

Taille du masque

Augmenter la taille du masque augmente la précision

Nombre d'arcs dans le graphe de recherche augmente



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

Ponts et tunnels

Overview

Roads

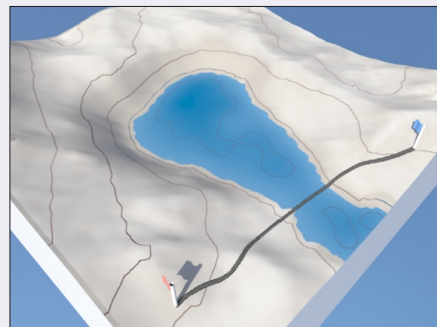
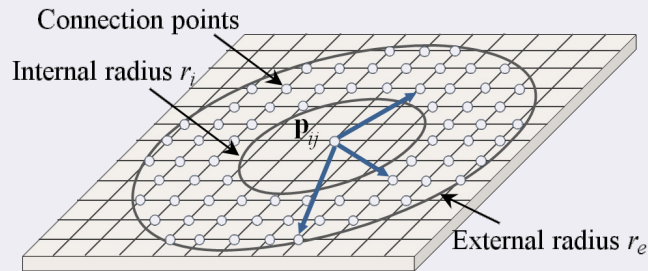
Road networks

Problem

Bridges and tunnels require large masks

Create **straight** bridges and tunnels with long edges in the graph

$$T(\mathbf{p}_{ij}) = \{ \mathbf{q} \neq \mathbf{p}_{ij}, r_i \leq \|\mathbf{p}_{ij} - \mathbf{q}\| \leq r_e \}$$



Technique	Cost	Time
Only road	65 778	0,8
Road + Bridge	45 974	47,8



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

Echantillonnage aléatoire

Overview

Roads

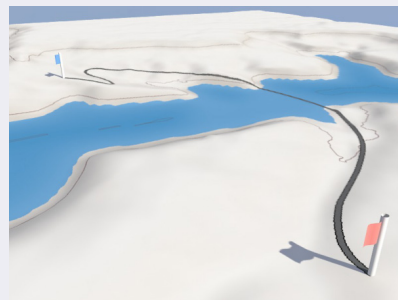
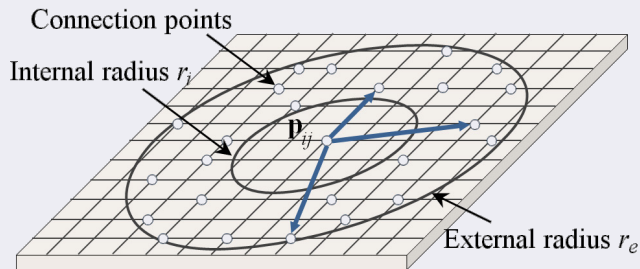
Road networks

Problem

Number of arcs too important

Complexity of the algorithm in $O(a n \ln n)$

Stochastic sampling on the set of arcs



Technique	Cost	Time
Bridge	89 210	149,0
Stochastic bridge	91 222	5,8



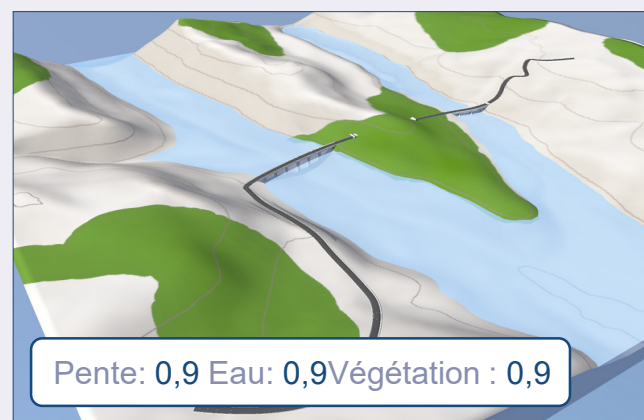
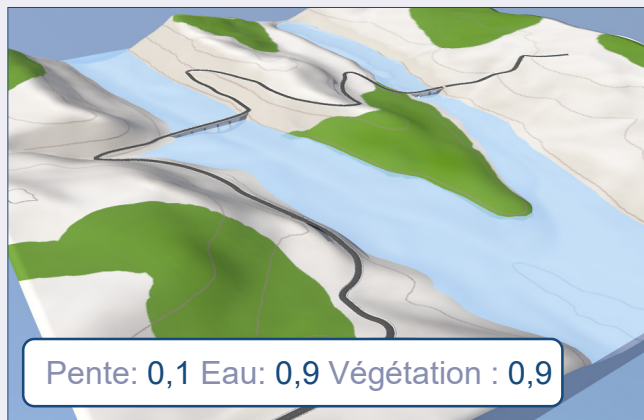
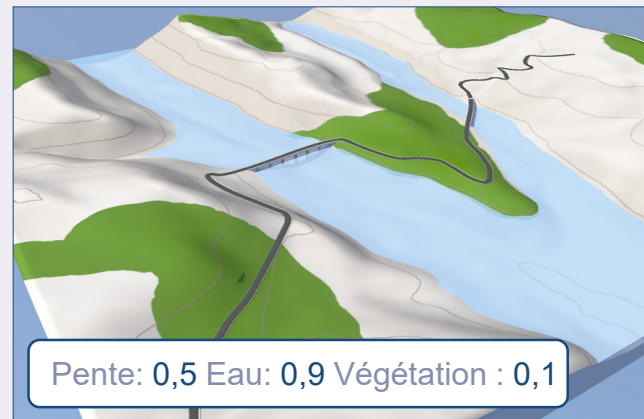
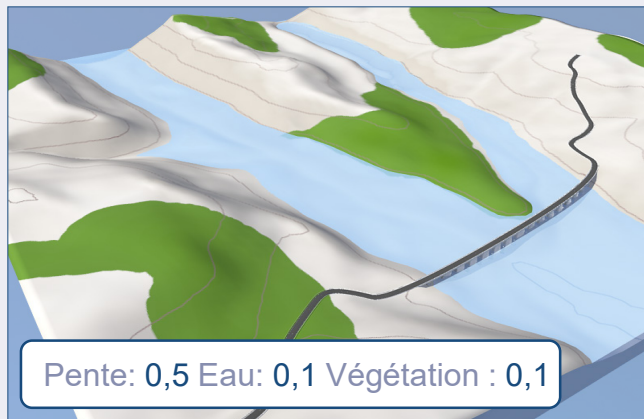
eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalain>

Contrôle

Overview

Roads

Road networks



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

Roads : terraforming and geometry generation

Terrassement du terrain et génération de la géométrie

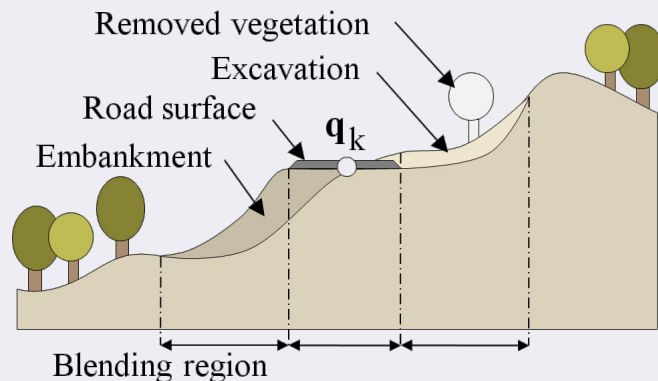
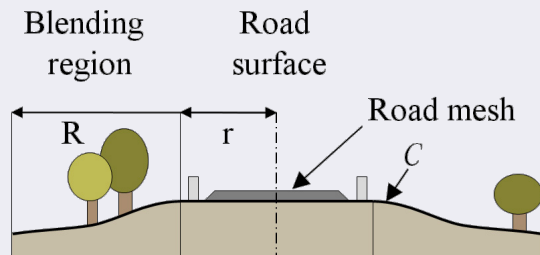
Overview

Roads

Road networks

Terrain

Excavations et terrassement à l'aide de primitives le long de la trajectoire



Ponts, tunnels, routes

Modèles géométriques paramétrés



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



Ghost Recon Wildlands
Courtesy of Benoit Martinez, UBISOFT

Route

Route de montagne avec lacets et évitement des zones boisées



Résultats

Overview

Roads

Road networks



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

Résultats

Overview

Roads

Road networks



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

A Review of Digital Terrain Modeling

Road Networks

Génération procédurale de réseaux routiers

Overview

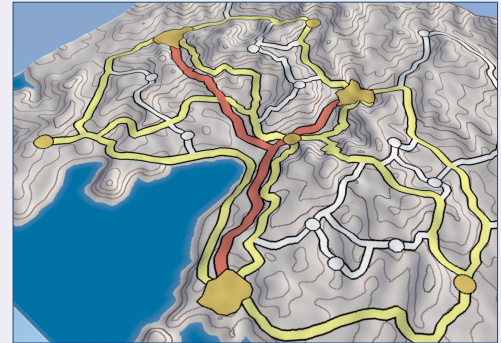
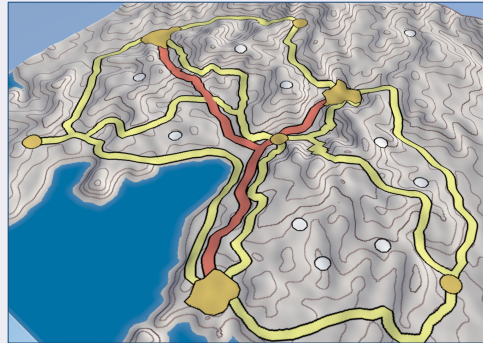
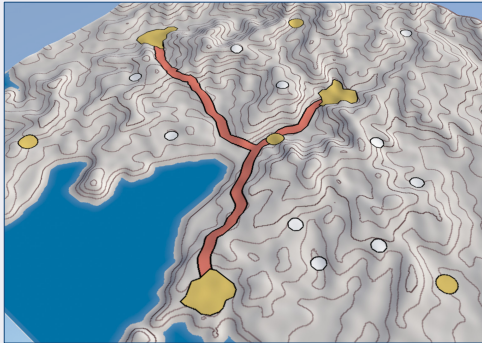
Roads

Road networks

Challenge : Génération d'un réseau **hiérarchique**
Contraintes du terrain selon les différents types de routes

Proposition

Génération d'un **graphe géométrique** de proximité de **squelettes de trajectoire**
Fonctions de cout pour chaque type de route



Génération de réseaux routiers

Overview

Roads

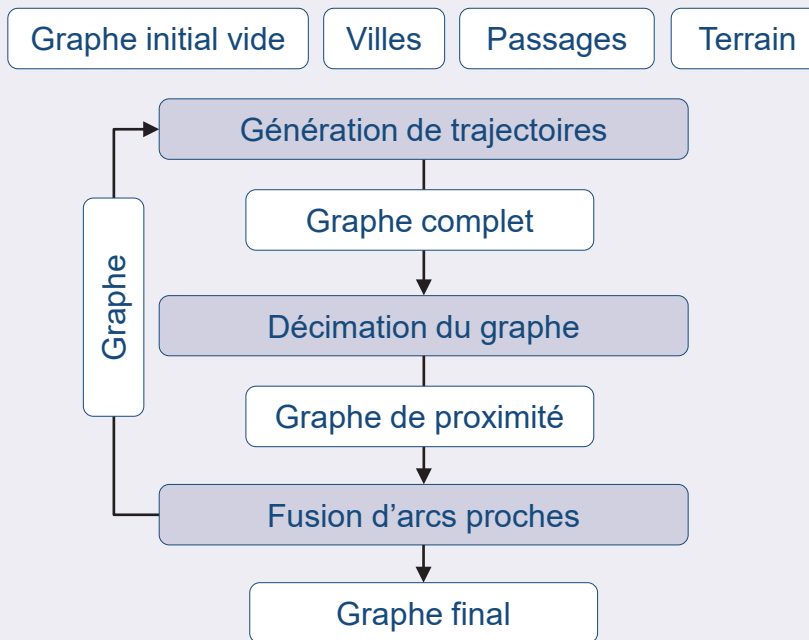
Road networks

Principe

Construction incrémentale des voies selon leur hiérarchie

Sélection des arcs du graphe complet par construction d'un **graphe géométrique**

Métrique non Euclidienne



eric.galin@liris.cnrs.fr

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

Graphes de Delaunay

Overview

Roads

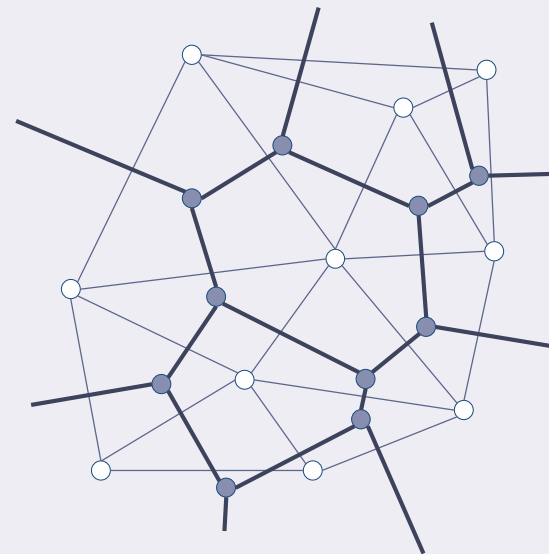
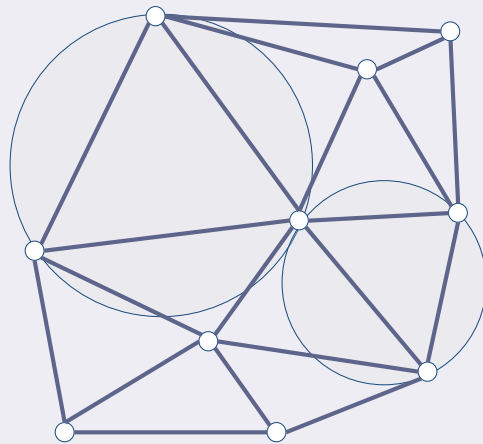
Road networks

Définition

Le graphe de Delaunay est une triangulation $D(\mathcal{P})$

Aucun point \mathbf{p}_k n'appartient au cercle circonscrit d'un des triangles de $D(\mathcal{P})$

$D(\mathcal{P})$ est le dual du diagramme de Voronoï de \mathcal{P}



eric.galin@liris.cnrs.fr

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

Graphes de proximité

Overview

Roads

Road networks

Graphes de proximité

Graphes géométriques connectant des points

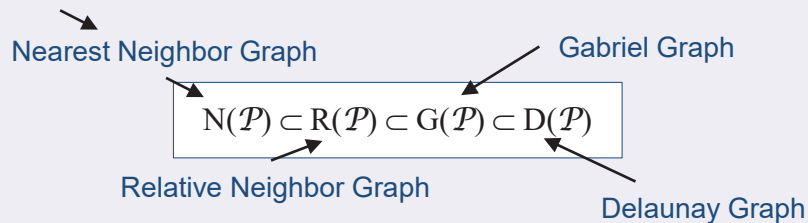
Le critère de création d'un arc entre deux points dépend d'une mesure de leur proximité

Définitions

Soit un ensemble \mathcal{P} de points $\mathbf{p}_k, k \in [0, n-1]$

Le graphe complet \mathcal{G} connecte tous les points entre eux

Peut posséder des composantes disjointes



Une arête $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ existe lorsque : $\forall \mathbf{p} \in \{\mathbf{p}_k\} - \{\mathbf{a}, \mathbf{b}\}$ on a $d(\mathbf{a}, \mathbf{b}) < d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{p}_k)$

On note $\Omega(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ la zone d'exclusion liée à $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$

Le graphe d'Urquhart $U(\mathcal{P})$ se construit de $D(\mathcal{P})$ en retirant l'arête la plus longue de chaque triangle



eric.galin@liris.cnrs.fr

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

Plus proche voisin et graphe de Gabriel

Overview

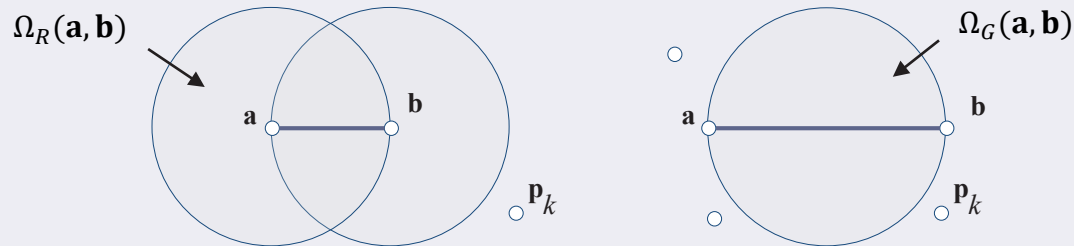
Roads

Road networks

Définitions

Pour le relative neighbors graph $R(\mathcal{G})$, une arête $[ab]$ existe lorsque :

$$\forall p \in \{p_k\} - \{a, b\} \quad d(a, b) < \max(d(a, p_k), d(b, p_k))$$



Pour le graphe de Gabriel $G(\mathcal{G})$, une arête $[ab]$ existe lorsque :

$$\forall p \in \{p_k\} - \{a, b\} \quad d^2(a, b) < d^2(a, p_k) + d^2(b, p_k)$$



eric.galin@liris.cnrs.fr

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

β - Squelettes

Overview

Roads

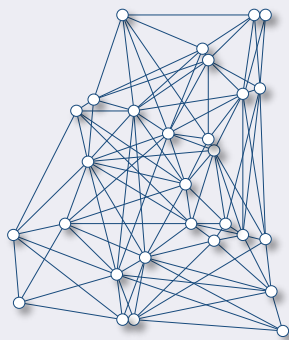
Road networks

Définition

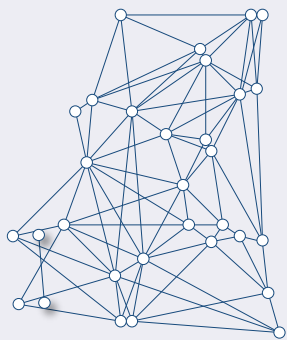
Famille paramétrée de graphes allant du graphe vide au graphe complet

Critère de lune ou de cercle

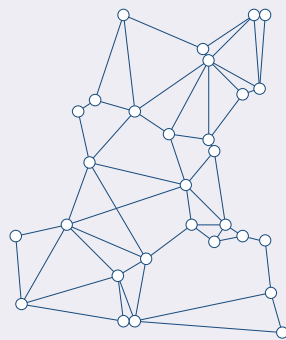
On retrouve les graphes $G(\mathcal{G})$ et $R(\mathcal{G})$ pour $\beta = 1$ et $\beta = 2$ respectivement



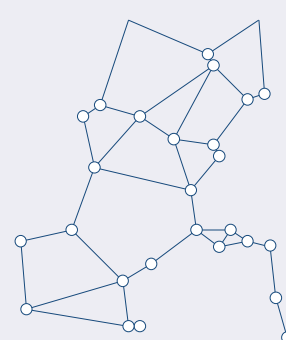
$\beta = 1.1$



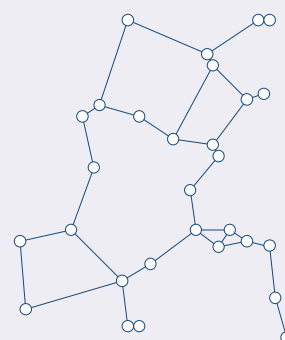
$\beta = 1.2$



$\beta = 1.5$



$\beta = 2.0$



$\beta = 4.0$



eric.galin@liris.cnrs.fr

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

Graphe de proximité

Overview

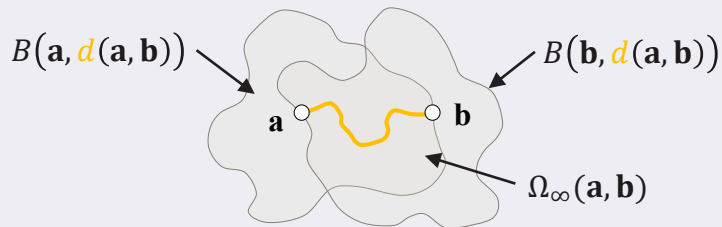
Roads

Road networks

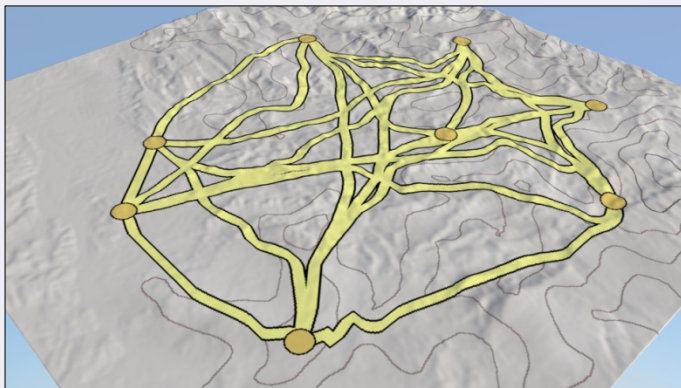
Construction

Gamma squelette : graphe géométrique selon une distance d non Euclidienne [Galín2011]

$$\Omega_\gamma(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \{\mathbf{p} \in \Omega, d(\mathbf{a}, \mathbf{b})^\gamma < d(\mathbf{a}, \mathbf{p})^\gamma + d(\mathbf{b}, \mathbf{p})^\gamma\}$$



$$\Omega_{\gamma=\infty} = R(P) \text{ et } \Omega_{\gamma=2} = G(P)$$



E. Galin, A. Peytavie, E. Guerin, B. Benes. Authoring Hierarchical Road Networks. *Computer Graphics Forum*, 29(7), 2011.

Simplification

Overview

Roads

Road networks

Raccordement et simplification

Fusion des parties de trajectoires proches les unes des autres



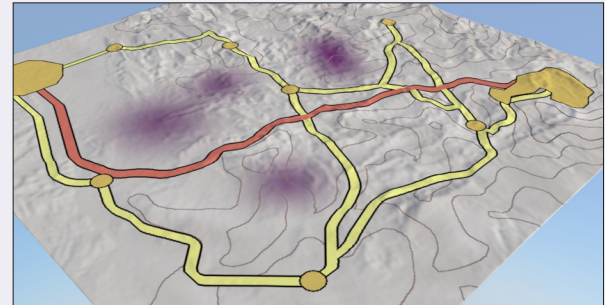
eric.galin@liris.cnrs.fr
<http://liris.cnrs.fr/~egalain>

Différents niveaux

Modification de la fonction de coût dans le voisinage des routes déjà créées

Vidéo

$$c(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{p}}) = v(\mathbf{p}) + w(\mathbf{p}) + s(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) + g(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{p}}) + h(\mathbf{p})$$



A Review of Digital Terrain Modeling

Supplementary Material

A* shortest path algorithm

While Q is not empty, select p_{ij} with minimal value

If $p_{ij} = \mathbf{b}$, stop the algorithm

For all $\mathbf{q} \in \mathcal{M}_k(p_{ij})$, evaluate the cost $c(p_{ij}, \mathbf{q}) + h(\mathbf{q})$

If $c(p_{ij}, \mathbf{q}) + h(\mathbf{q}) < c(\mathbf{q})$ then predecessor of \mathbf{q} is p_{ij}

Heuristic $h(\mathbf{p}) < c(\mathbf{p}, \mathbf{q}) + h(\mathbf{q})$, $h(\mathbf{p}) = \|\mathbf{b} - \mathbf{p}\|$

Graph

Graph complexity : nodes $O(n^2)$ and arcs $O(n^2 k^2)$

$500^2 \times 16 = 4\text{M}$ nodes, $500^2 \times 16 \times 48 = 192\text{M}$ arcs

Using masks and acceleration by stochastic sampling

Complexity

$O(|\mathcal{V}|^2 + |\mathcal{E}|)$ si recherche dans une liste

$O((|\mathcal{E}| + |\mathcal{V}|) \ln |\mathcal{V}|)$ pour une recherche dans un tas binaire

$O(|\mathcal{E}| + |\mathcal{V}| \ln |\mathcal{V}|)$ pour un tas de Fibonacci



Initialisation

Pour tous les nœuds n fixer $c(n)$ à l'infini
Fixer la liste \mathcal{N} au nœud de départ o

Mise à jour des coûts

Mise à jour du coût entre deux nœuds n et q

Si $c(q) > c(n) + c(n, q)$ alors

$$c(q) \leftarrow c(n) + c(n, q)$$

$$a(q) \leftarrow n \text{ (ancêtre)}$$

Algorithme général

Tant que \mathcal{L} n'est pas vide

Trouver $n \in \mathcal{N}$ ayant le coût minimum $c(n)$

Retirer n de \mathcal{N}

Mettre à jour le coût des nœuds q voisins de n

Construction du chemin

Initialiser une liste $\mathcal{L} \leftarrow \emptyset$ et un nœud $n \leftarrow b$

Tant que $n \neq o$

Ajouter $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} + n$ et $n \leftarrow a(n)$

