

Reconstruction de surfaces

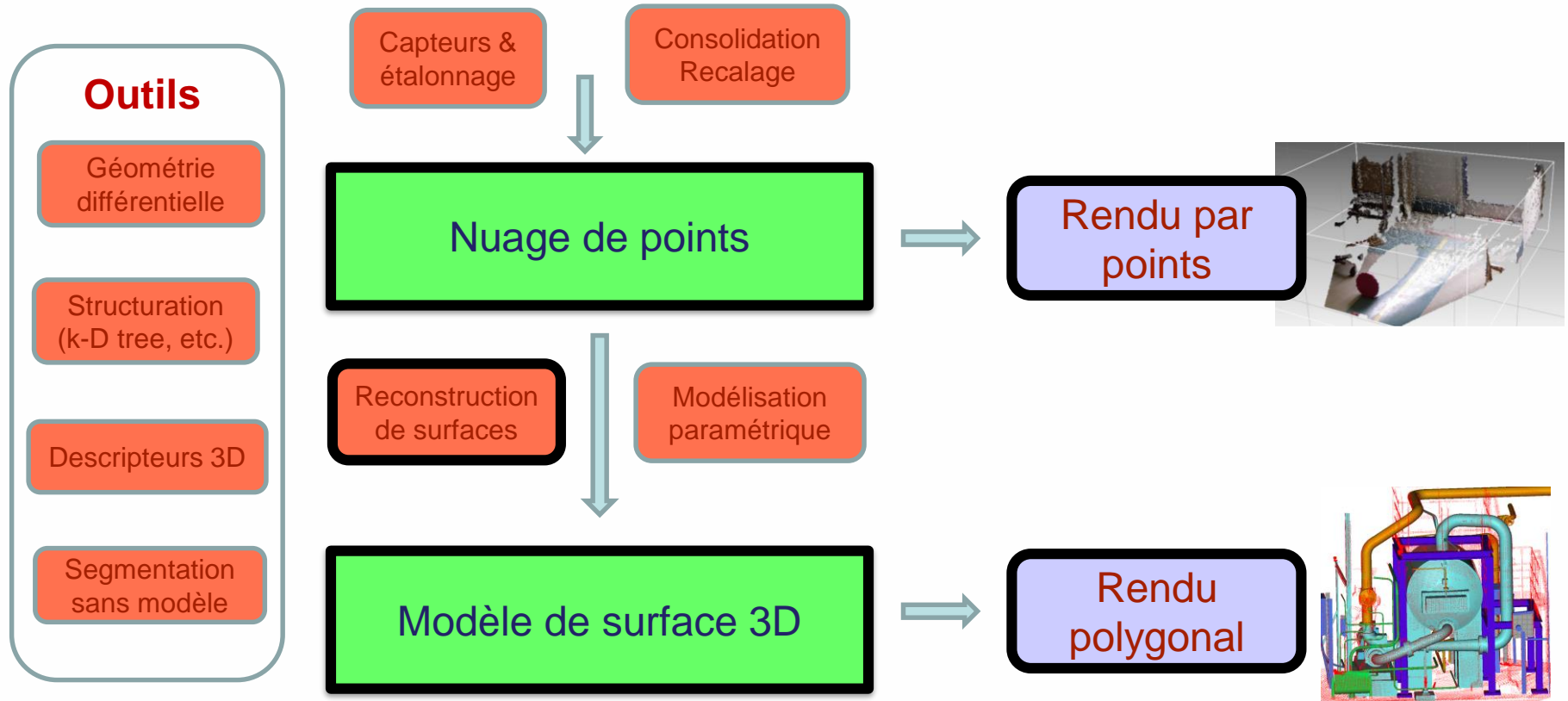
Jean-Emmanuel DESCHAUD

jean-emmanuel.deschaud@mines-paristech.fr

Centre de Robotique
MINES ParisTech

Nuages de points et modélisation 3D

Vue d'ensemble



Plan du cours

I. Introduction / Problématique

II. Amélioration du rendu

III. Reconstruction de surfaces

I. Problématique / Contraintes

II. Représentations d'une surface

III. Méthode Locale : IMLS

IV. Méthode Globale : Poisson

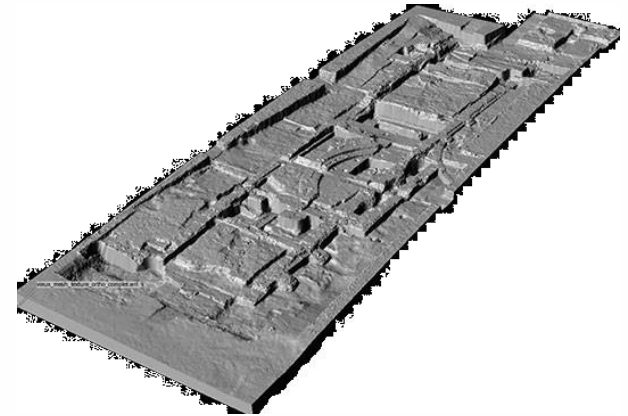
Pourquoi faire de la reconstruction de surfaces?

- Exemple de visualisation d'un nuage de points sous CloudCompare

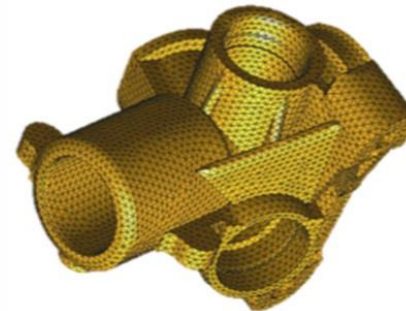


Domaines d'applications

- Génie civil / Archéologie
 - Archivages, restitutions
- Secteur médical
 - Modèle 3D dentaire
- Industrie
 - Etude de conformité de pièces mécaniques
- Simulateurs



Modèle 3D du Forum Gallo-Romain de Vieux-la-Romaine



Projet au Centre de Robotique

- Création de modèles 3D de villes pour des simulateurs de train ou de tramway



Réalité



Modèle 3D

Deux approches

- Faire du rendu
 - Techniques sous OpenGL
- Faire de la reconstruction de surface
 - Géométrie algorithmique

Plan du cours

I. Introduction / Problématique

II. Amélioration du rendu

III. Reconstruction de surfaces

I. Problématique / Contraintes

II. Représentations d'une surface

III. Méthode Locale : IMLS

IV. Méthode Globale : Poisson

Rendu de nuage de points



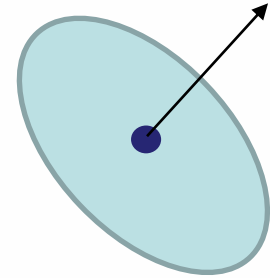
Rendu de nuage de points

- Visibilité des objets cachés
 - Des objets cachés sont visibles par « transparence » du nuage de points
- Projection d'un point sur un pixel
 - Ne couvre pas tout l'écran

Splatting

[High-Quality Surface Splatting on Today's GPUs, 2005]

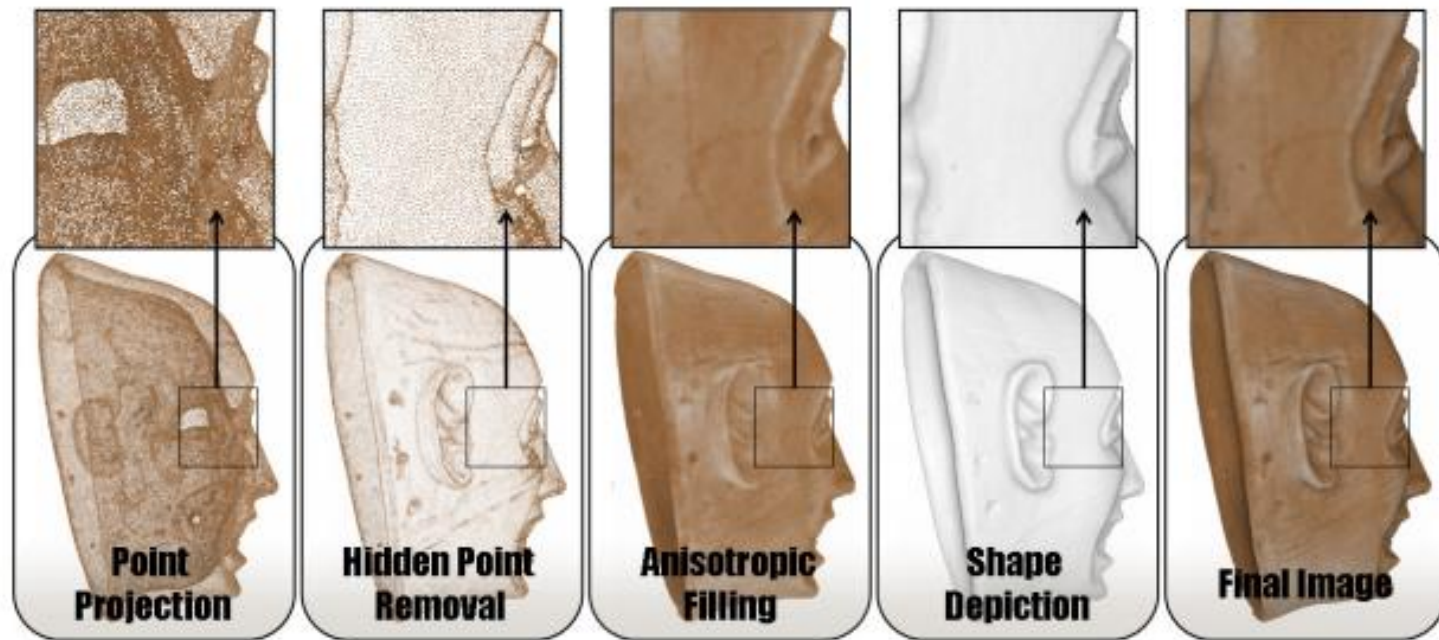
- Splat :
 - Point, normale, couleur, rayon
- Rayon = distance au kième voisin



Rendu en espace image

[Real-time Rendering of Massive Unstructured Raw Point Clouds using Screen-space Operators, 2011]

- Opérateurs espace image :
 - Visibilité
 - Remplissage



Amélioration du rendu points

[High quality and efficient direct rendering of massive real-worlds point clouds, 2017]

High quality and efficient direct rendering
of massive real-world point clouds

H. Bouchiba, R. Groscot, J-E. Deschaud and F. Goulette

MINES ParisTech, PSL Research University, CAOR - Centre de robotique, 60 Bd St Michel 75006 Paris, France

Application à l'archéologie



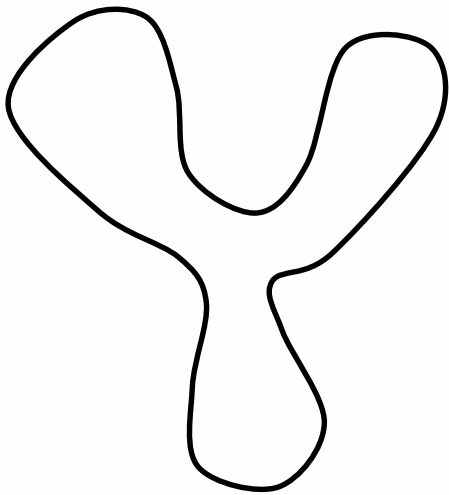
Bilan sur rendu

- Très bonne qualité de rendu
- Impression d'avoir un modèle 3D
- Mais pas réel
 - Pas possible de faire une impression 3D

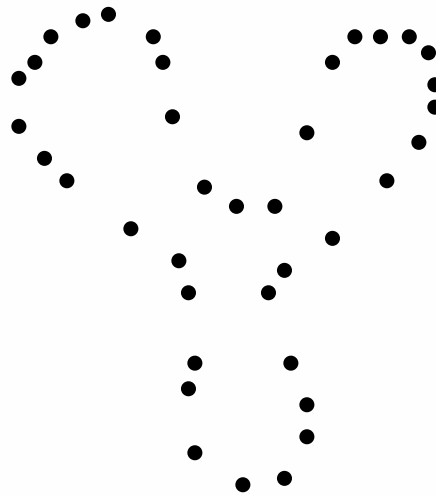
Plan du cours

- I. Introduction / Problématique
- II. Amélioration du rendu
- III. Reconstruction de surfaces**
 - I. Problématique / Contraintes**
 - II. Représentations d'une surface
 - III. Méthode Locale : IMLS
 - IV. Méthode Globale : Poisson

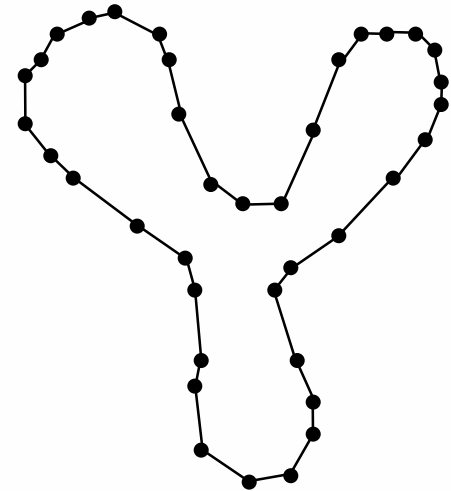
Problématique sur les courbes



Une courbe

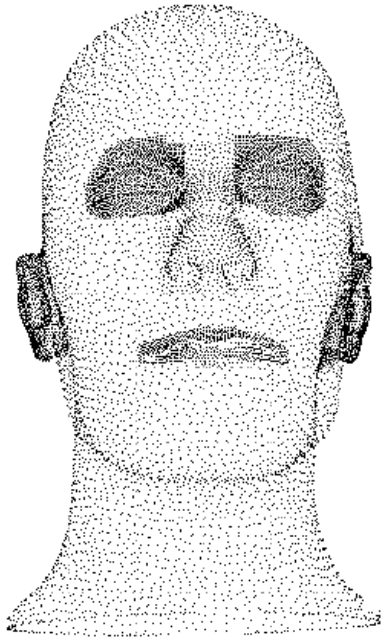


Ensemble de
points
échantillons

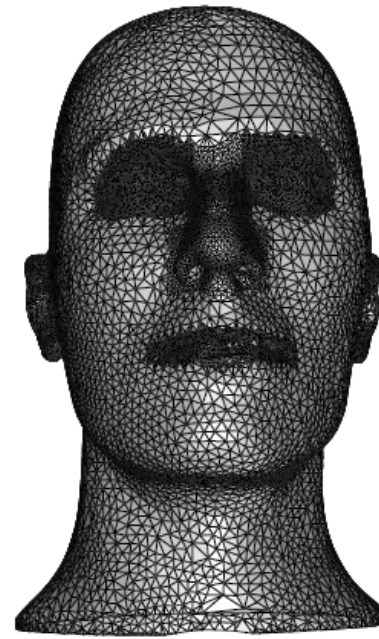


Courbe
reconstruite

Problématique sur les surfaces

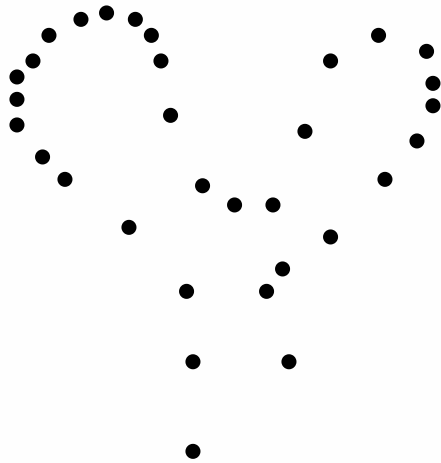


Ensemble de points

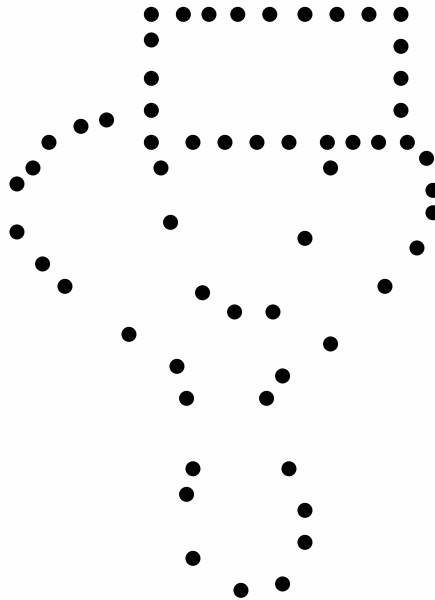


Surface reconstruite

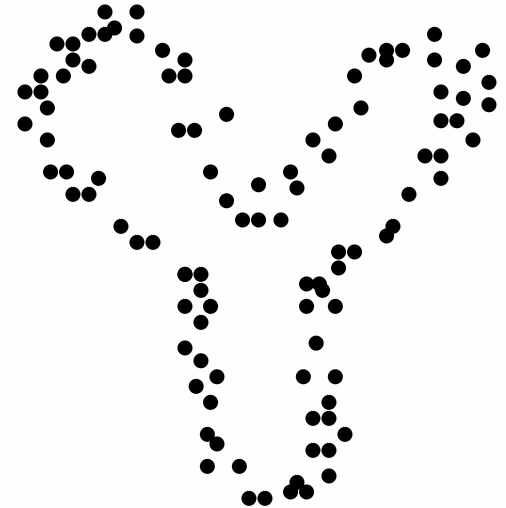
Problèmes pas aussi simples



Densité non homogène



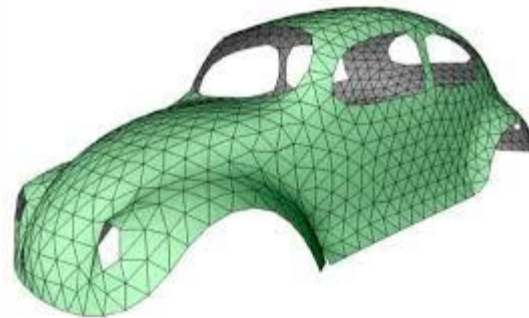
Superposition de courbes



Bruit de mesure

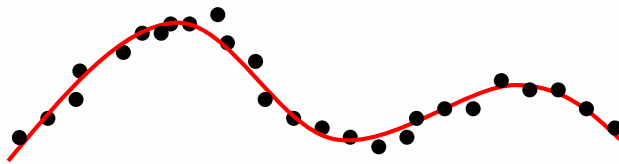
Contraintes de la reconstruction

- La surface reconstruite doit être :
 - Continue
 - Avec ou sans bords

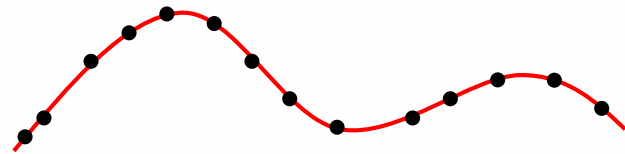


Contraintes de la reconstruction

- La surface reconstruite peut être :
 - Approximante
 - Interpolante



Surface approximante



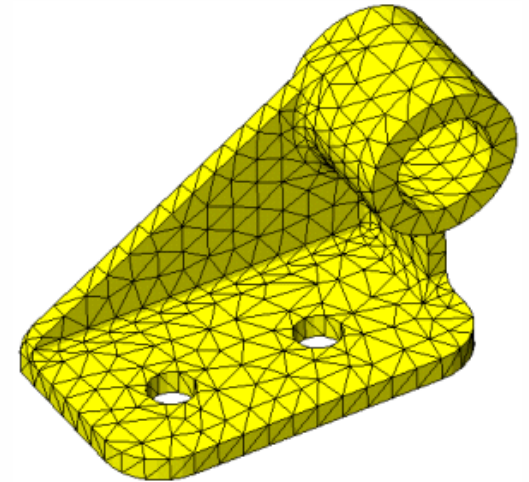
Surface interpolante

Plan du cours

- I. Introduction / Problématique
- II. Amélioration du rendu
- III. Reconstruction de surfaces**
 - I. Problématique / Contraintes
 - II. Représentations d'une surface**
 - III. Méthode Locale : IMLS
 - IV. Méthode Globale : Poisson

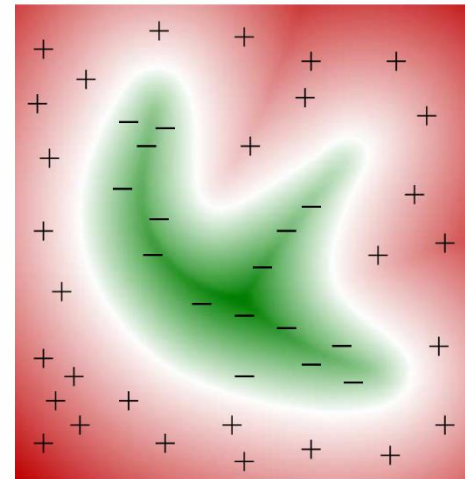
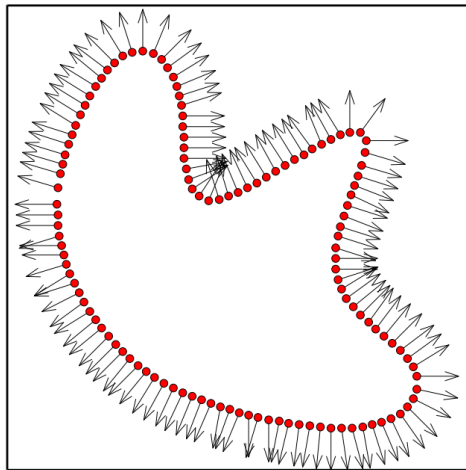
Représentation géométrique

- Maillage = ensemble de sommets connectés
 - Maillage polygonal : connexion entre sommets formant des cycles et définissant des polygones
 - Maillage triangulaire : polygone = triangle
 - On parle ici de maillage surfacique



Représentation implicite

- Fonction implicite dont l'iso-zéro représente la surface :



$$S = \{x \in \mathbb{R}^3, f(x) = 0\}$$

Changement de représentation

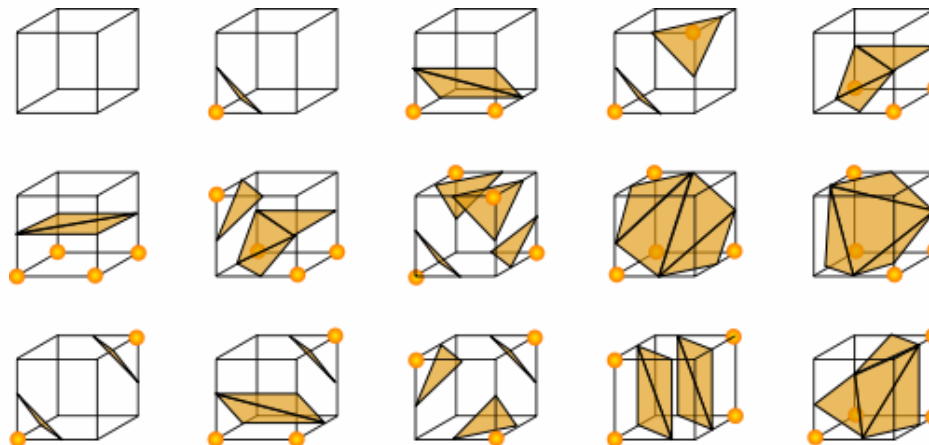


- Implicite -> Maillage :
 - Méthode classique : Marching cubes
- Maillage -> Implicite :
 - Choisir un maillage volumique (structure de données de type voxels, octree)
 - Prendre la distance des nœuds du maillage volumique au maillage surfacique

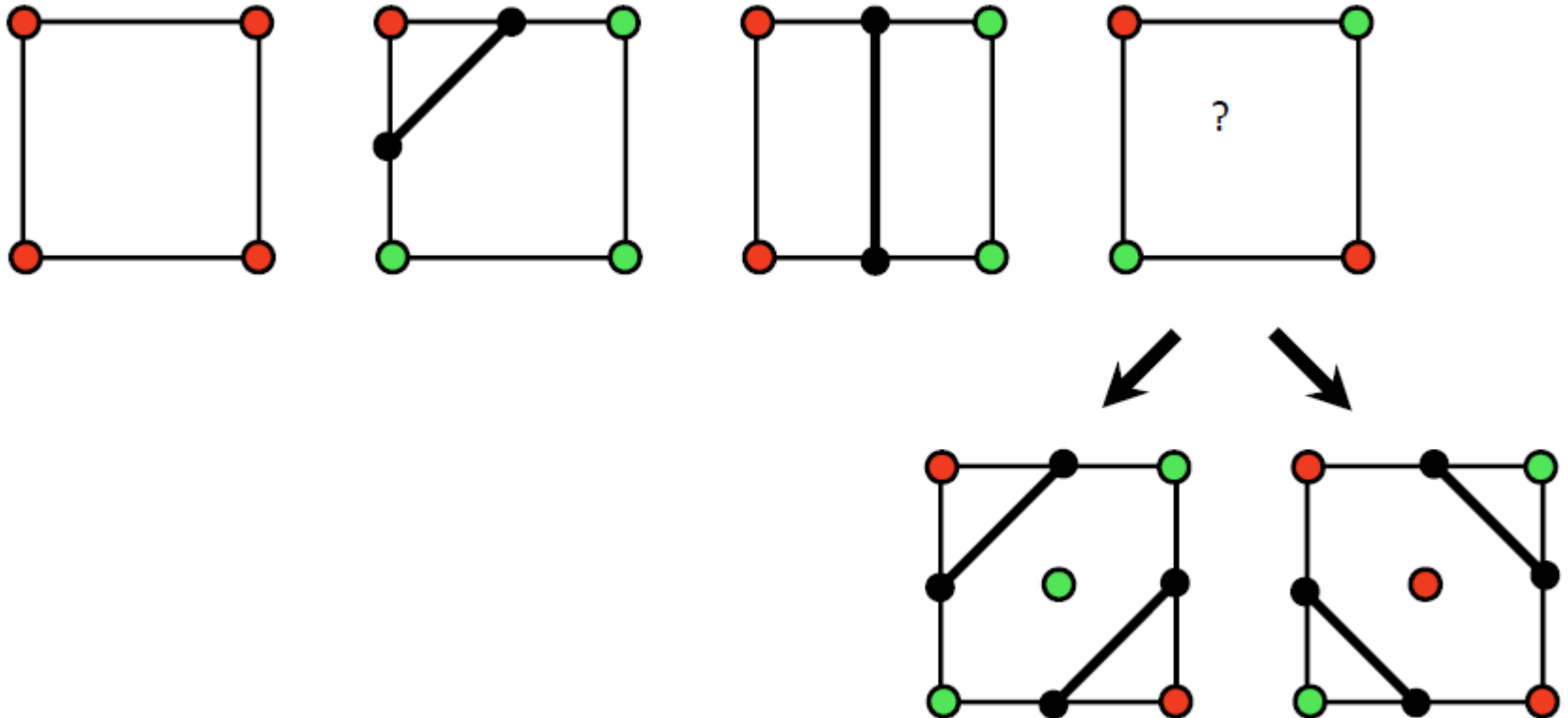
Marching Cubes

[Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, 1987]

- Espace découpé en voxels
- Fonction implicite calculée en chaque sommet d'un voxel
 - 256 possibilités qui amènent à la création de 0, 1, 2 ou 3 triangles dans chaque voxel

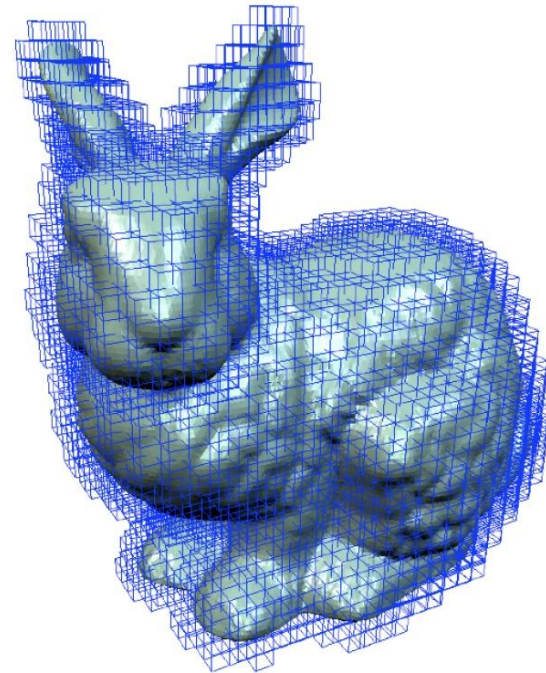


Exemple en 2D : Marching Squares

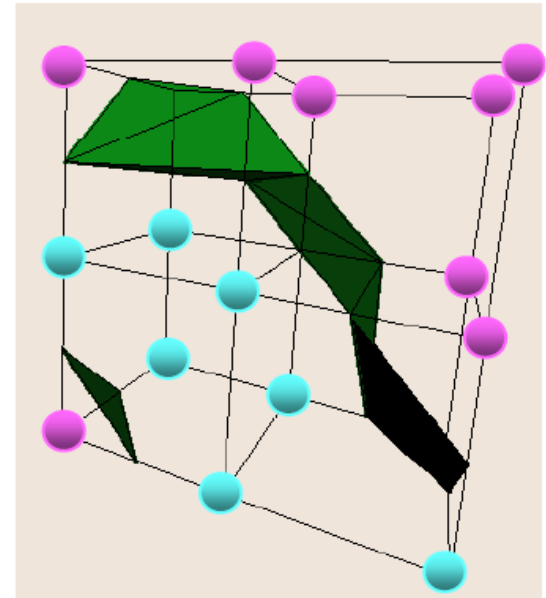
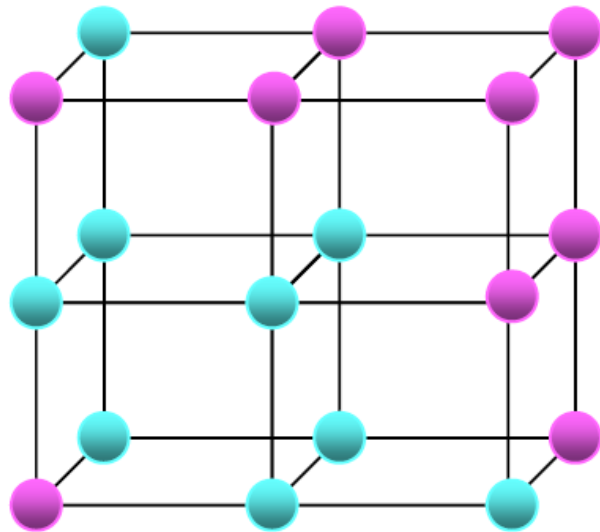


En 3D : Marching Cubes

- Classification des cellules:
 - Intérieur
 - Extérieur
 - Intersectant



3D : Marching Cubes



Plan du cours

I. Introduction / Problématique

II. Amélioration du rendu

III. Reconstruction de surfaces

I. Problématique / Contraintes

II. Représentations d'une surface

III. Méthode Locale : IMLS

IV. Méthode Globale : Poisson

Deux types de méthodes pour la reconstruction

- Méthode Locale
 - Voisinage local qui définit le nombre de points à prendre en compte
- Méthode Globale
 - Besoin de tous les points du nuage

Critères de bonne méthode de reconstruction

- Métrique d'évaluation ?
 - Représentation de l'incertitude des données
 - Preuve de convergence
 - Robustesse au bruit
 - Robustesse aux points aberrants
 - Restriction ou non à un type topologique
 - Rapidité/Mise à l'échelle (taille de l'échantillon) / Parallélisation possible?

Critères de bonne reconstruction

- Distance à une vérité terrain
 - Vérité Terrain (VT) obtenue par une technologie plus avancée / plus cher
 - Distance entre maillages
- Mesures relatives sur la surface réelle
 - Comparaison avec la surface reconstruite

Plan du cours

I. Introduction / Problématique

II. Amélioration du rendu

III. Reconstruction de surfaces

I. Problématique / Contraintes

II. Représentations d'une surface

III. Méthode Locale : IMLS

IV. Méthode Globale : Poisson

Plan du cours

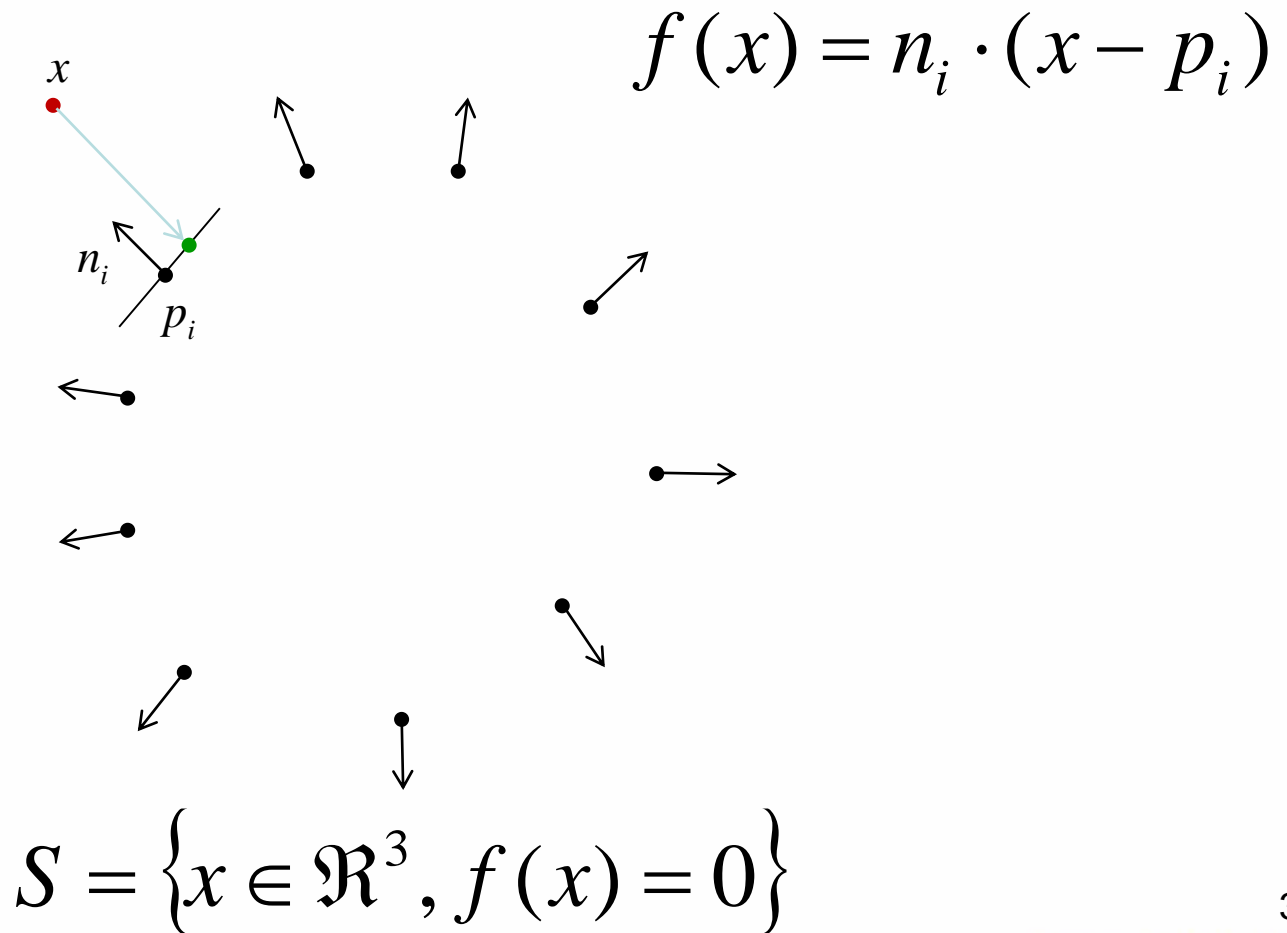
I. Méthode locale : IMLS

- a) Reconstruction de Hoppe (1992)
- b) Ajustement par moindres carrés glissants (fonctions réelles)
- c) Adaptation aux surfaces : IMLS

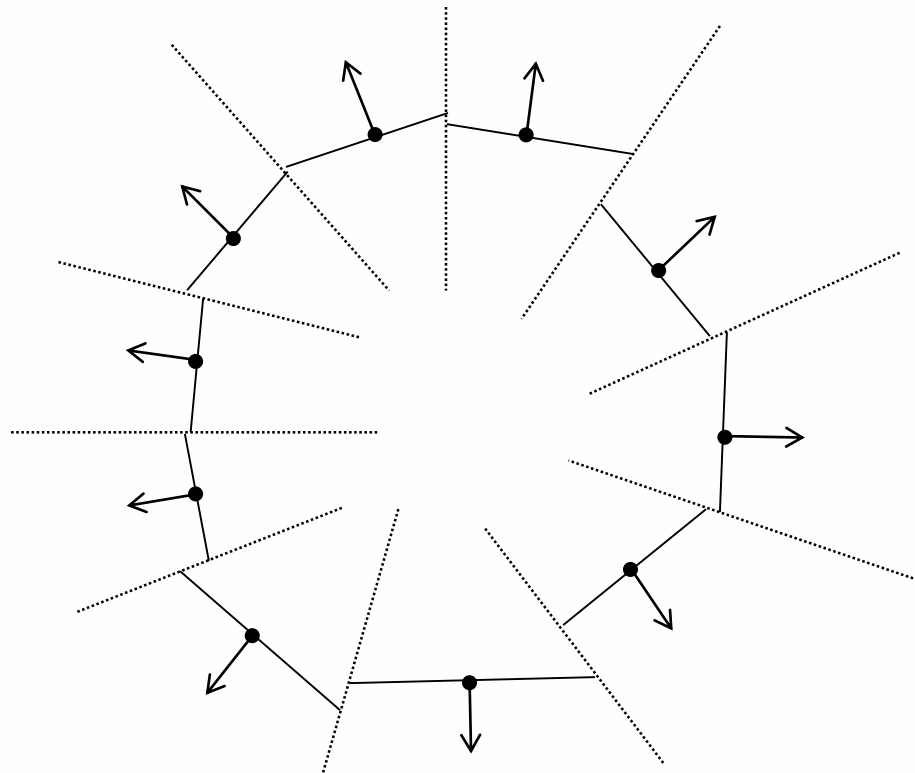
Méthode de Hoppe (1992)

[Surface reconstruction from unorganized points, 1992]

- Principe :



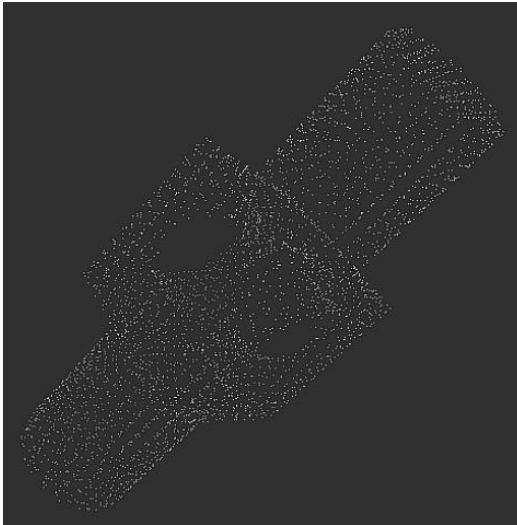
Méthode de Hoppe (1992)



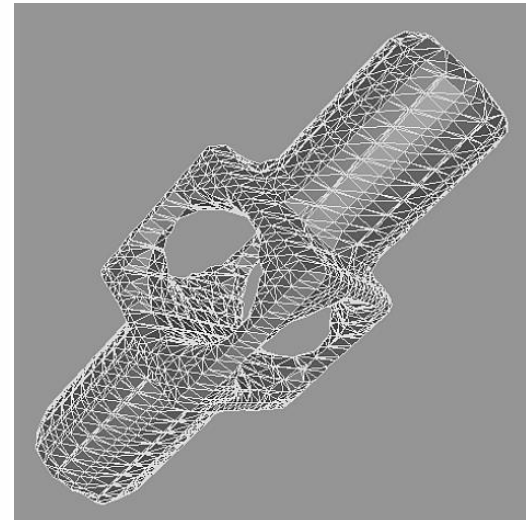
Surface non continue

Méthode de Hoppe (1992)

- Résultat



Nuage de 4102 points
venant d'un modèle
CAO



Maillage obtenu par
marching cubes

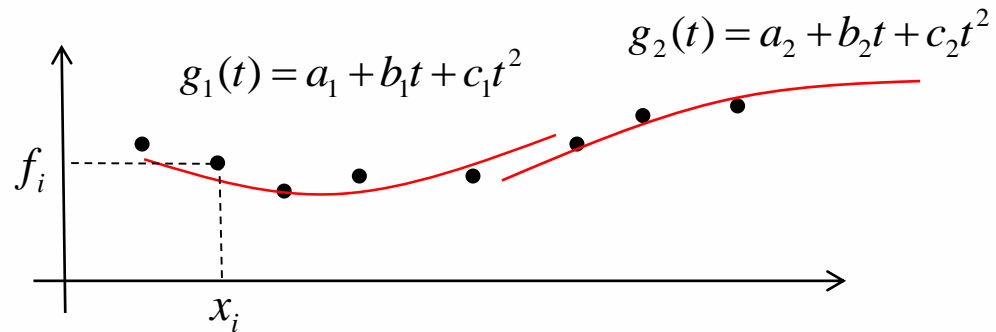
Plan du cours

I. Méthodes locales par projection

- a) Méthode de Hoppe (1992)
- b) Ajustement par moindres carrés glissants (fonctions réelles)
- c) Adaptation aux surfaces : MLS explicite

Limitation de la résolution par moindre carré

- Ajustement de quadriques par moindre carré est non continu



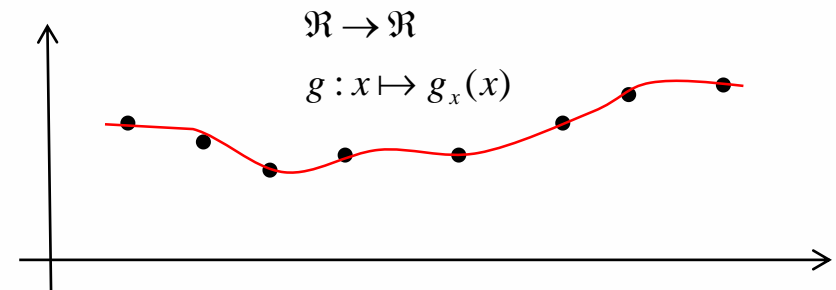
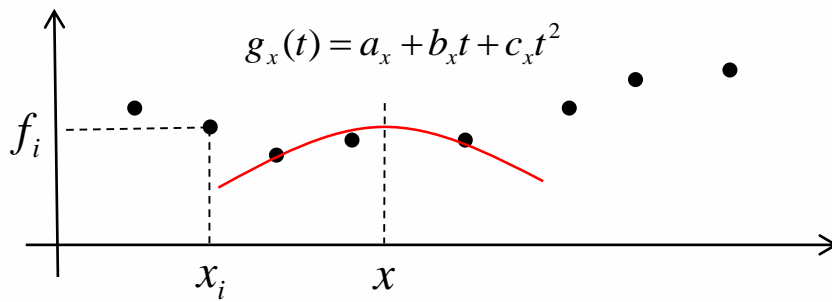
$$\min_g \sum_i (f_i - g(x_i))^2$$

$$\text{avec } g(t) = a + bt + ct^2$$

Moindre carrés glissants

[The Approximation Power of Moving Least-Squares, 1998]

- Ajustement par Moving Least Squares (MLS)



$$\min_{g_x} \sum_i (f_i - g_x(x_i))^2 \theta(|x - x_i|)$$

$$\text{avec } g_x(t) = a_x + b_x t + c_x t^2 \text{ et } \theta(y) = e^{-\frac{y^2}{h^2}}$$

Plan du cours

I. Méthodes locales par projection

- a) [Hoppe et al, 1992]
- b) Ajustement par moindres carrés glissants (fonctions réelles)
- c) Adaptation aux surfaces : Implicit Moving Least Squares (IMLS)

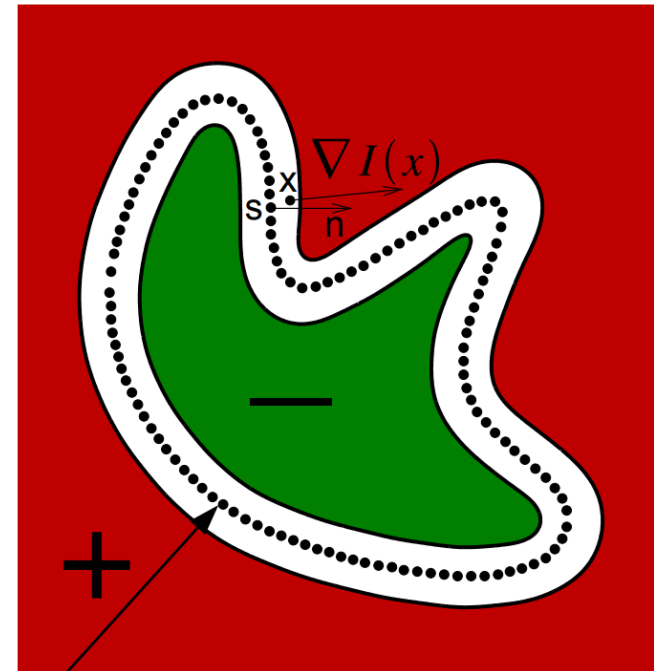
Implicit Moving Least Squares (IMLS)

[Provably Good Moving Least Squares, 2005]

- Fonction IMLS :

$$I(x) = \frac{\sum_i (n_i \cdot (x - p_i)) \theta(x - p_i)}{\sum_i \theta(x - p_i)}$$

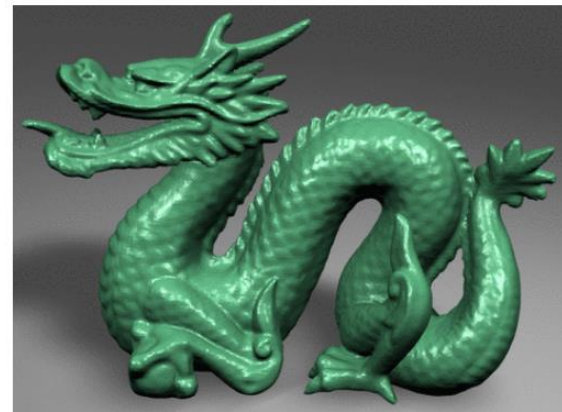
avec $\theta(x - p_i) = e^{-\frac{\|x - p_i\|^2}{h^2}}$



Iso-zéro de I

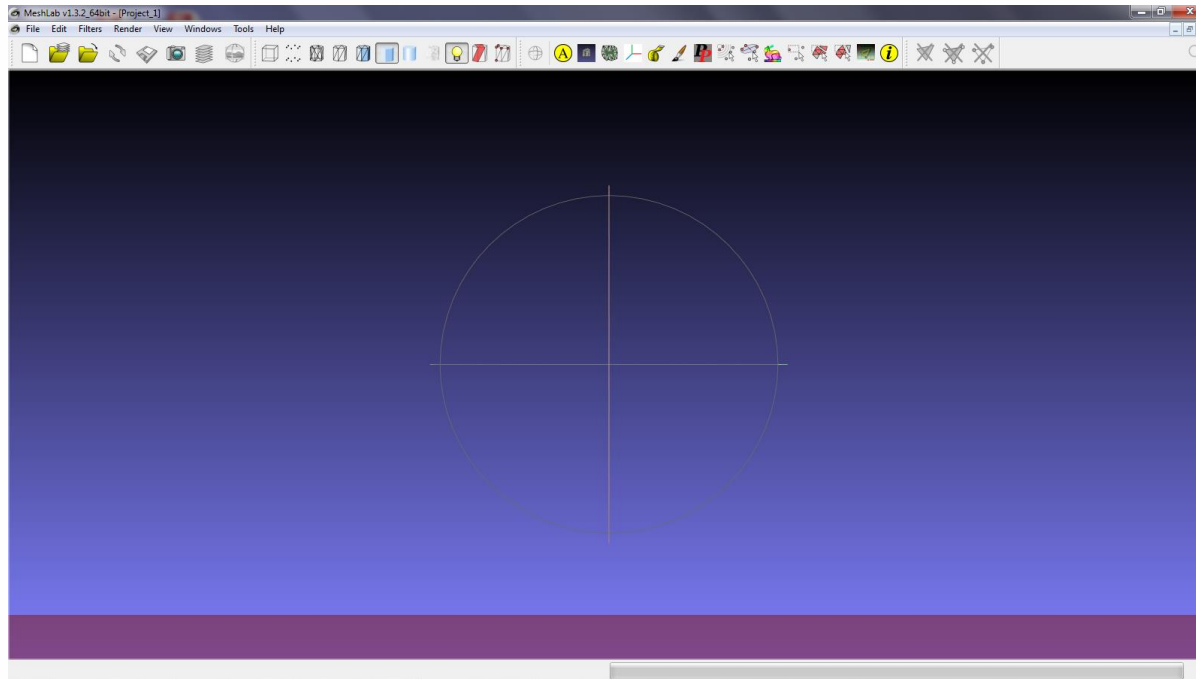
Quelques résultats

- Surfaces IMLS :



Démonstration

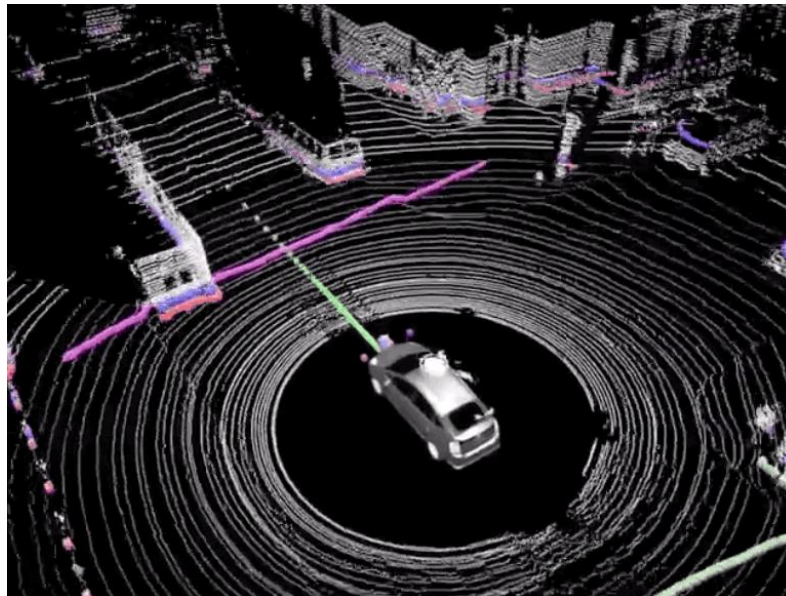
- Démonstration sous Meshlab : Reconstruction par RIMLS [Feature Preserving Point Set Surfaces based on Non-Linear Kernel Regression, 2009]



Autre application : 6-DOF SLAM

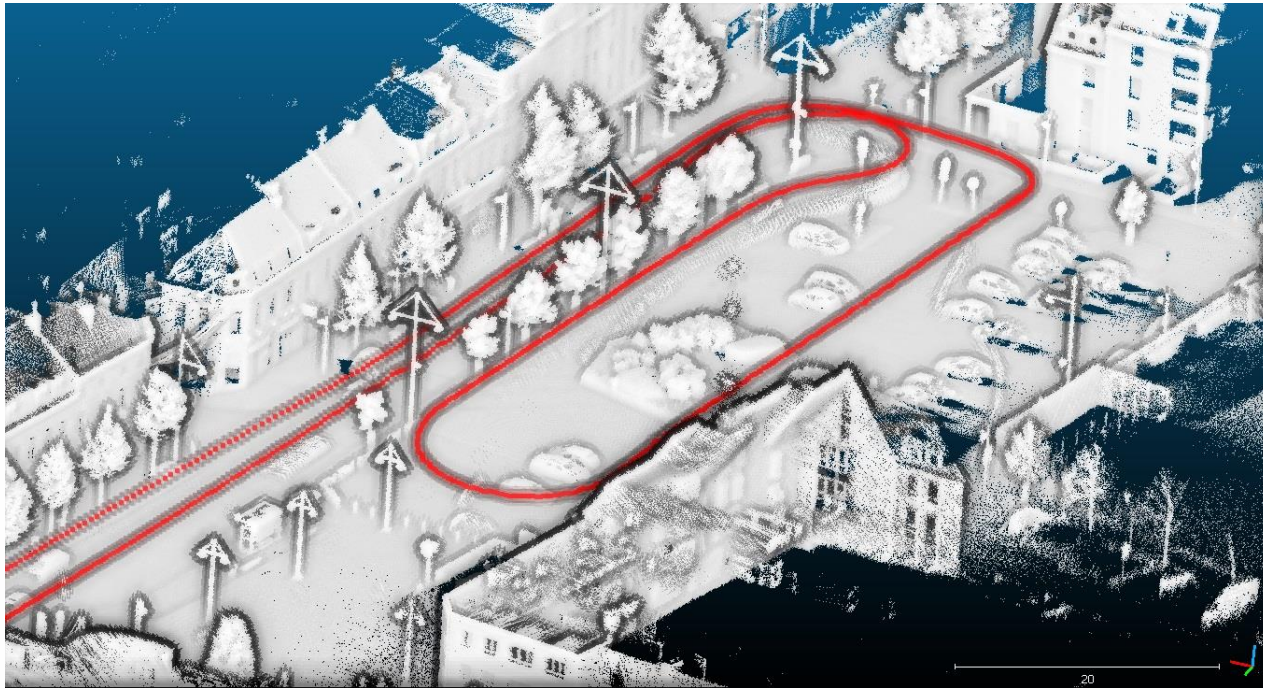
[IMLS-SLAM: scan to model matching based on 3D Lidar data, 2018]

- Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)
- Basé appariement scan à modèle IMLS



Terra3D

Résultat du SLAM



Nuage de points produit par le SLAM (en rouge, la trajectoire du véhicule)

Comparaison : notre SLAM vs ScanToScan



En rouge, trajectoire de notre SLAM
En noir une méthode classique ScanToScan

Plan du cours

I. Introduction / Problématique

II. Amélioration du rendu

III. Reconstruction de surfaces

I. Problématique / Contraintes

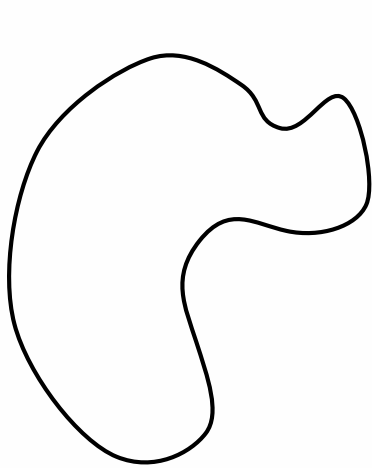
II. Représentations d'une surface

III. Méthode Locale : IMLS

IV. Méthode Globale : Poisson

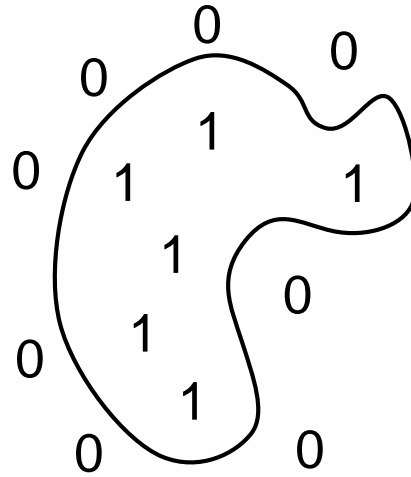
Reconstruction de surface par Poisson

[Poisson Surface Reconstruction, 2006]



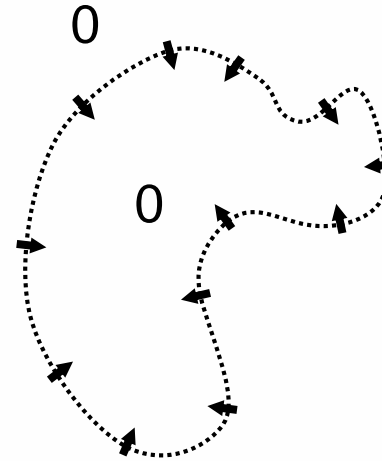
2-variété inconnue

M



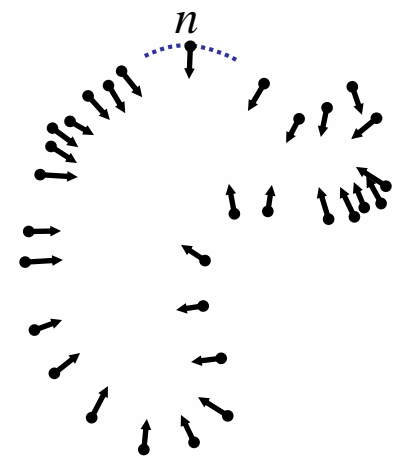
Fonction indicatrice

χ_M



Gradient de l'indicatrice

$\nabla \chi_M$



Points orientés

S

$$\nabla \chi_M \approx V$$

Approche de Poisson

- Trouver la fonction χ qui approxime le gradient en minimisant E:

$$E(\chi) = \int \|\nabla \chi(p) - \vec{V}(p)\|^2 dp.$$

i.e. résoudre l'équation de Poisson :

$$\Delta \chi = \nabla \cdot V$$

- Extraire l'isosurface $\chi^{-1}(0.5)$

Discrétisation

- Définir un espace de fonctions pour χ et V :

$$\chi(p) = \sum_{i=1}^N x_i B_i(p)$$

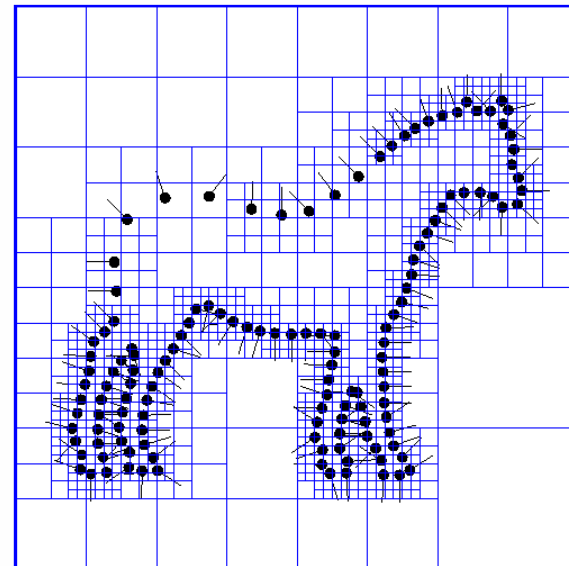
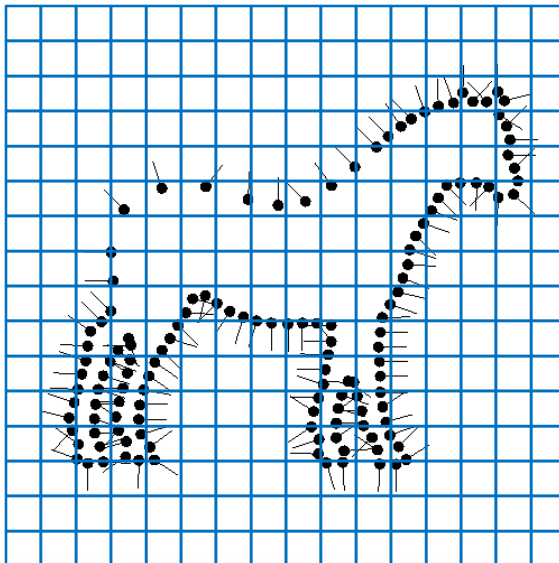
- On veut résoudre : $\Delta\chi = \nabla \cdot V$
- Cela revient à résoudre : $Ax = b$

avec

$$A_{ij} = \langle \nabla B_i, \nabla B_j \rangle_{[0,1]^3} \quad b_i = \langle \vec{V}, \nabla B_i \rangle_{[0,1]^3}$$

Discrétisation

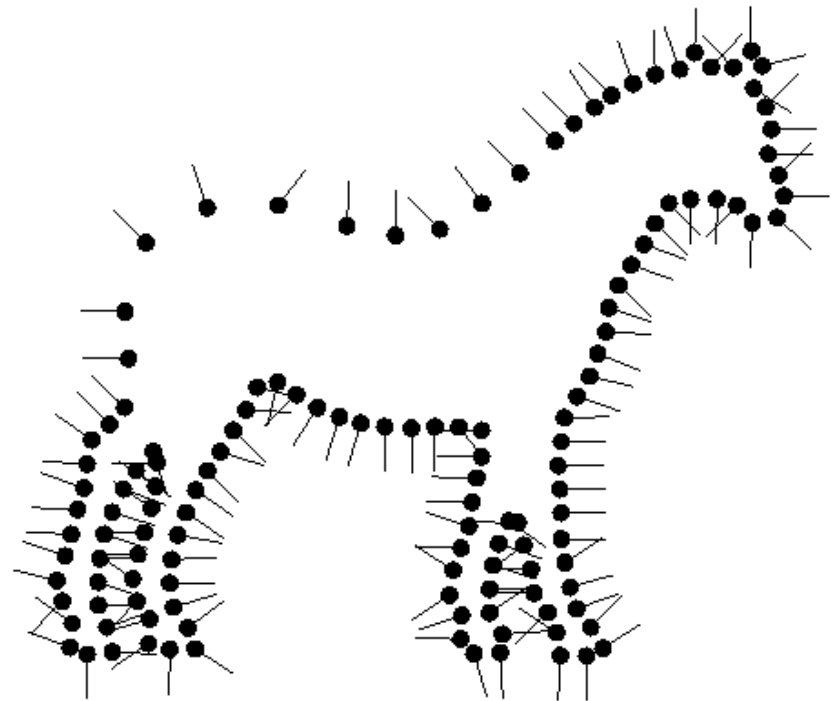
- Besoin d'une solution précise seulement près de la surface
→ Octree (arrêt : 1 point par cellule)



Implémentation

En partant des échantillons:

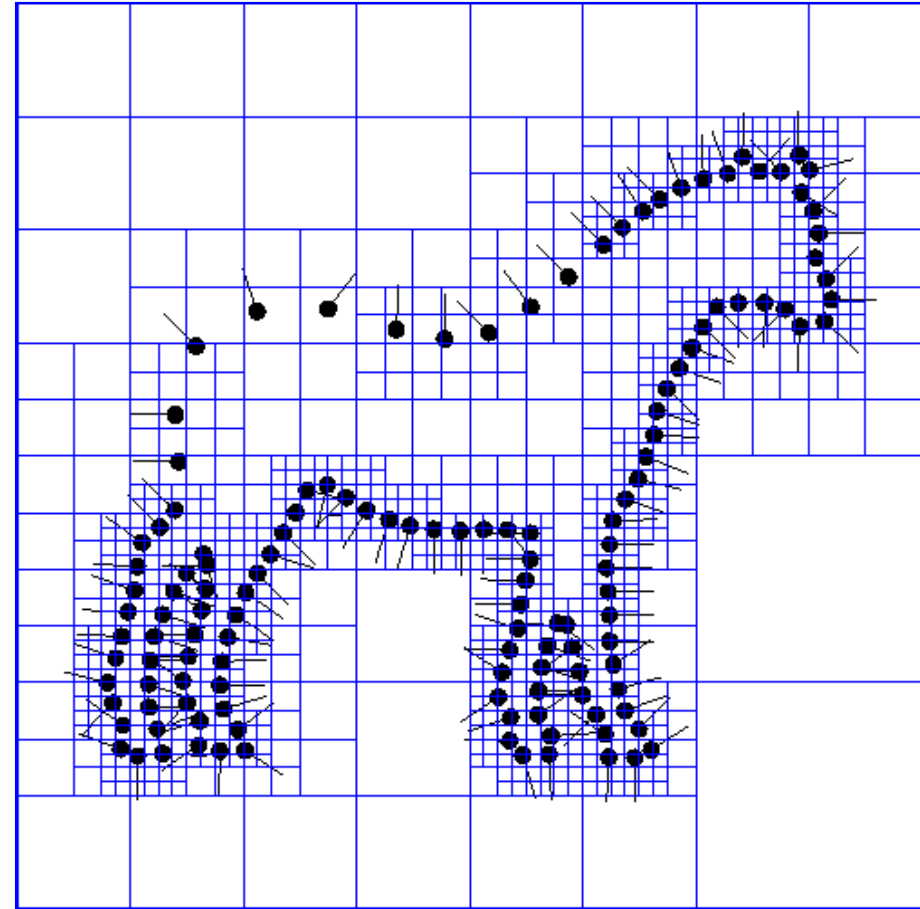
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
- Extraire l'isosurface



Implémentation: octree

En partant des
échantillons :

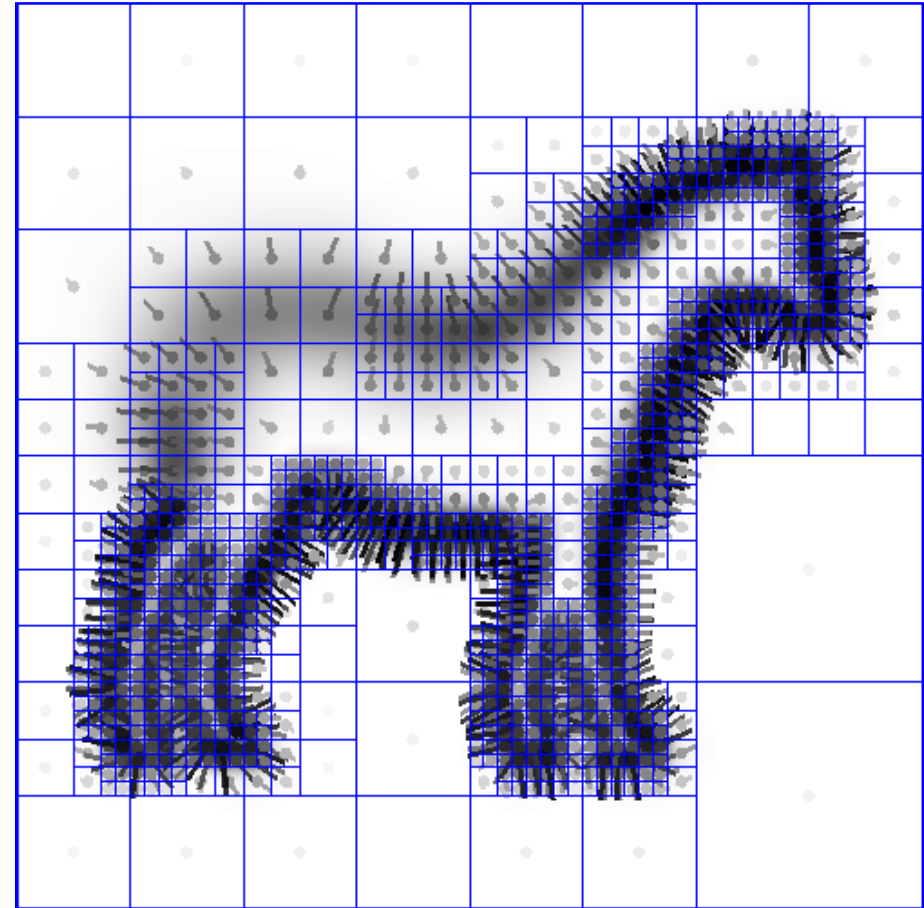
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
- Extraire l'isosurface



Implémentation: champs de vecteur

En partant des échantillons:

- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
- Extraire l'isosurface



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de Poisson
- Extraire l'isosurface



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

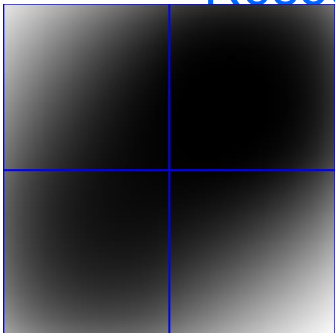
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de Poisson
- Extraire l'isosurface



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

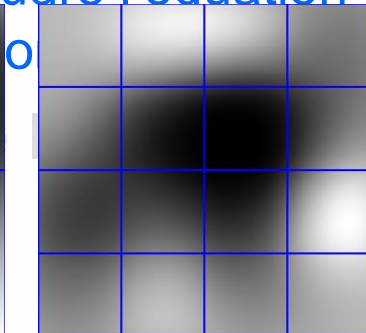
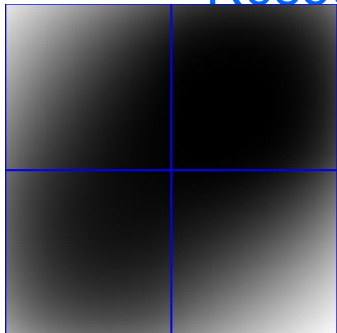
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de Poisson
 - Extraire l'isosurface



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

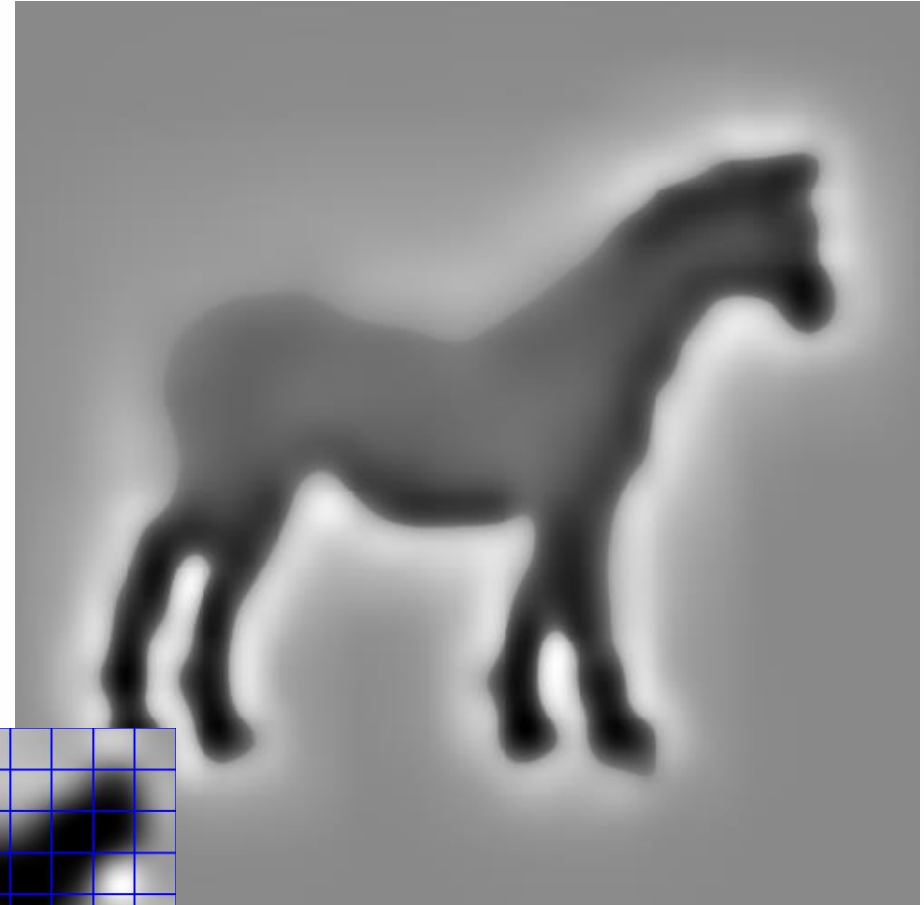
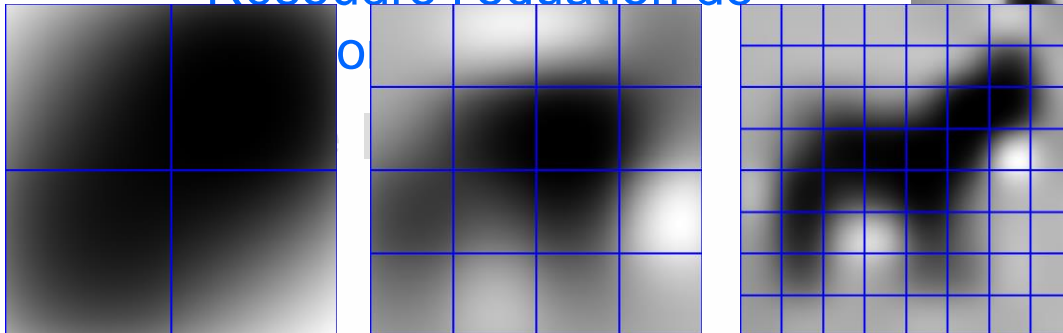
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

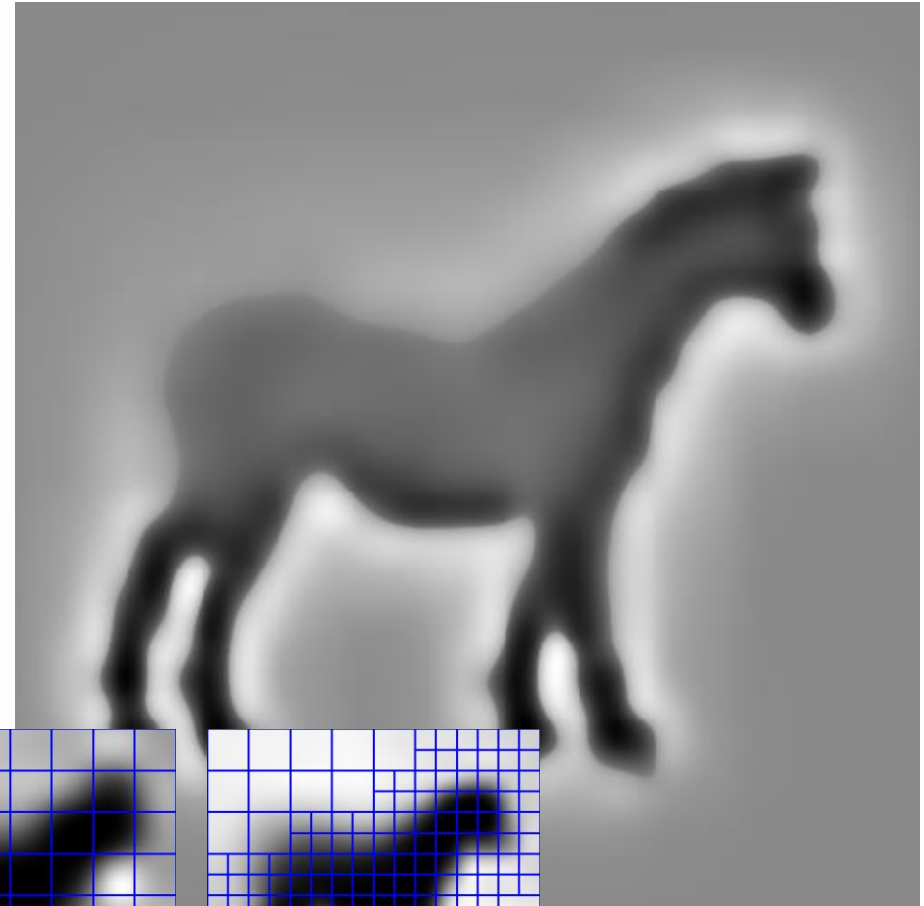
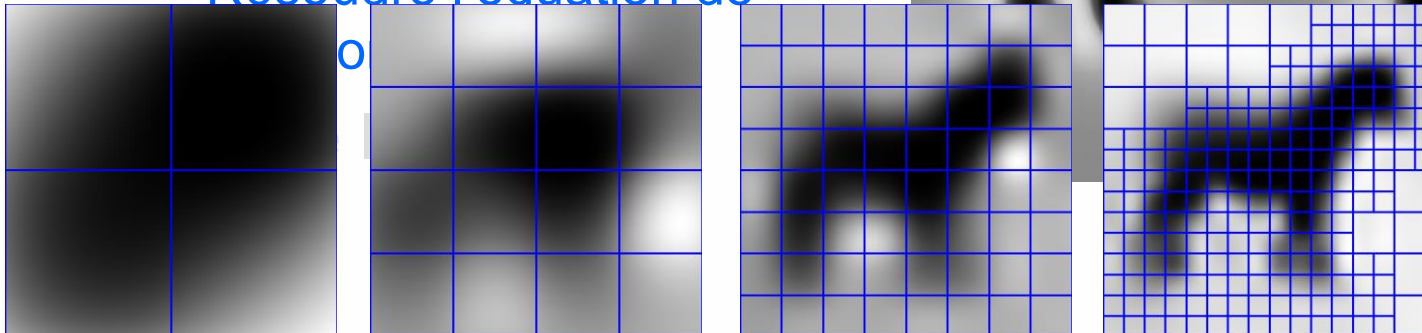
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

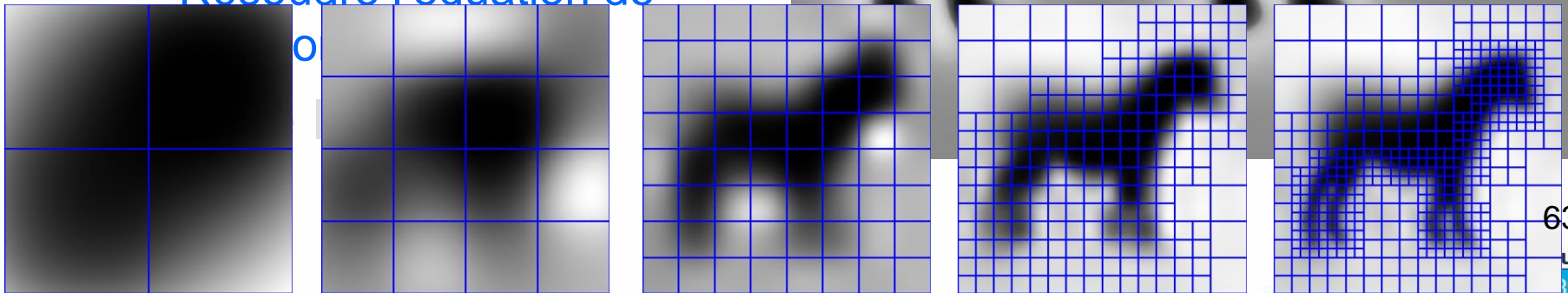
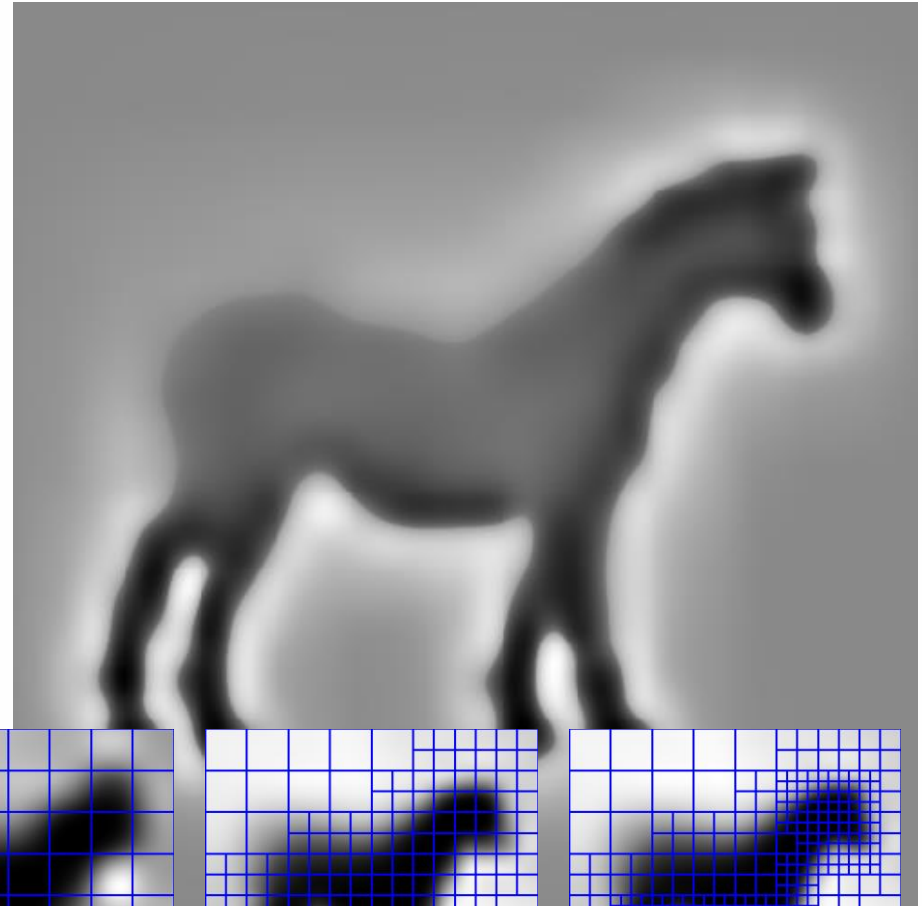
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de



Implémentation: fonction indicatrice

En partant des échantillons:

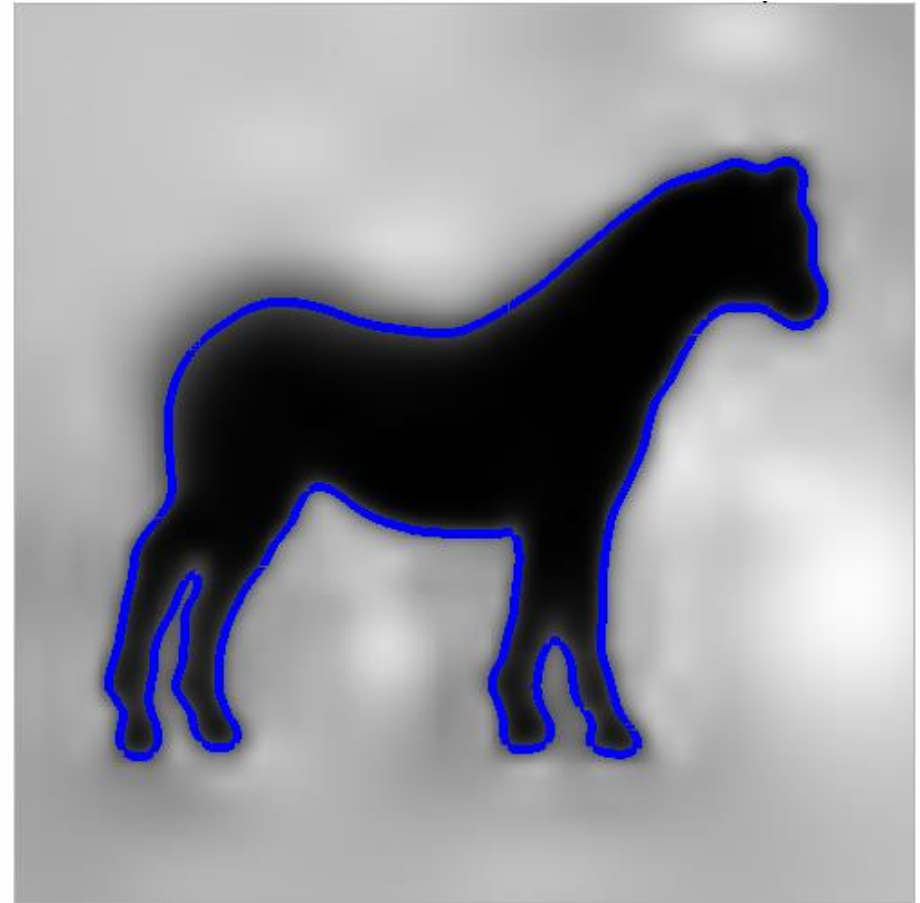
- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
 - Calculer la divergence
 - Résoudre l'équation de Poisson
- Extraire l'isosurface



Implémentation: extraction de la surface

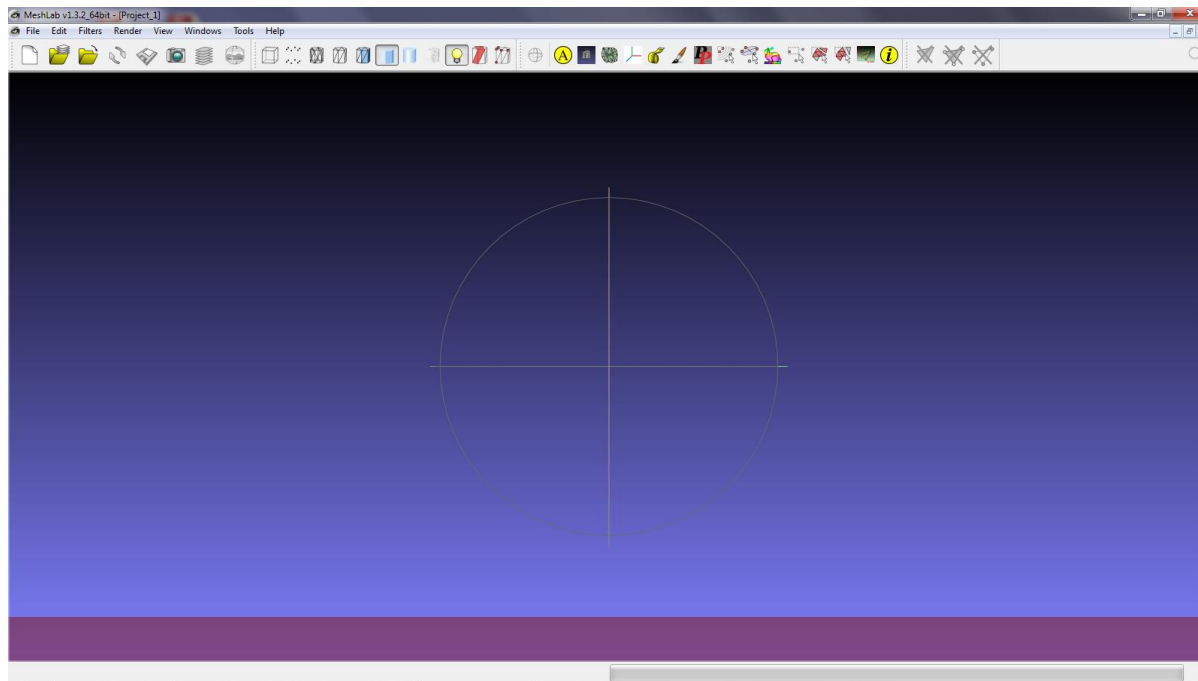
En partant des échantillons:

- Calculer l'octree
- Calculer le champs de vecteur
- Calculer la fonction indicatrice
- Extraire l'isosurface



Démonstration

- Démonstration sous Meshlab : reconstruction de Poisson

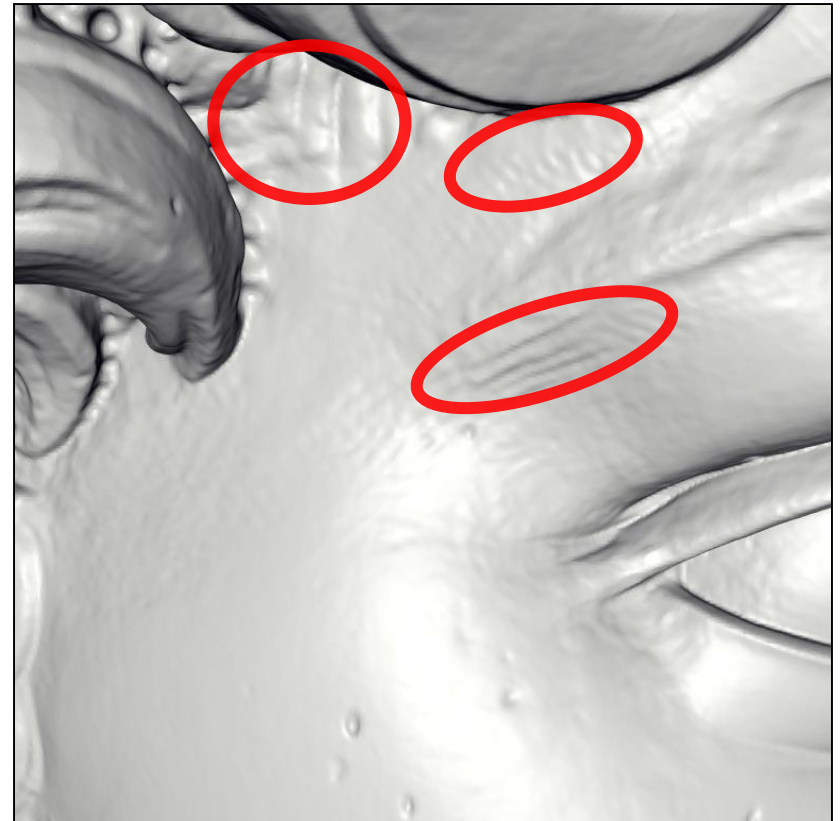


Résultat : David de Michelangelo



- 215 millions de points provenant de 1000 scans
- 22 millions de triangles après la reconstruction
- Temps de calcul : 2.1 heures
- Pic d'usage mémoire: 6600MB

David – coups de burin



Reconstruction de Poisson

- Contributions théoriques :
 - Points orientés \Leftrightarrow Gradient d'une indicatrice
 - Reconstruction comme problème global de Poisson
 - Résolution reste un système linéaire creux

Reconstruction de Poisson

- Avantages empiriques:
 - Robuste au bruit
 - S'adapte à la densité d'échantillonnage
- Inconvénients :
 - Nécessite normales et orientations
 - Effectue un filtrage passe-bas dépendant de la profondeur de l'octree

FIN

- I. Introduction / Problématique
- II. Amélioration du rendu
- III. Reconstruction de surfaces
 - I. Problématique / Contraintes
 - II. Représentations d'une surface
 - III. Méthode Locale : IMLS
 - IV. Méthode Globale : Poisson