

## 5ETI Synthèse d'images: Maillage avancé

CPE Lyon  
damien.rohmer@cpe.fr

2012/2013

Maillage

## Caractéristique topologique

Maillage

## Plan du cours

- Caractéristiques topologiques.
- Structure de données avancées : Halfedge.
- Subdivision de maillage.
- Notion de calcul sur variété : Lissage Laplacien.

Maillage

## Caractéristique d'Euler-Poincaré

- Maillage à  $N_f$  faces,  $N_s$  sommets,  $N_a$  arêtes.

$$N_s - N_a + N_f = \chi = 2(c - g) - b$$

$\chi$  : Caractéristique d'Euler (Rappel : Gauss-Bonnet).

$c$  : Nbr composante connexes

$g$  : Nbr de trous (genre topologique)

$b$  : Nbr de bords



Hetroy

Wikipedia

Maillage

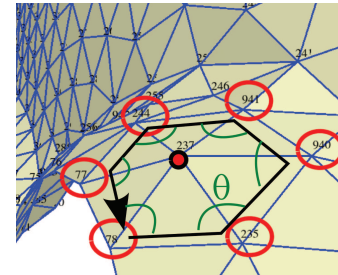
# Structure de données

Maillage

## Limitation encodage indexé

Encodage géométrie + connectivitée indexée

- + Affichage rapide (si contigu)
- + Générique
- + Simple
- Voisinage non encodé
- Ajout/suppression en  $\mathcal{O}(N)$ .



```

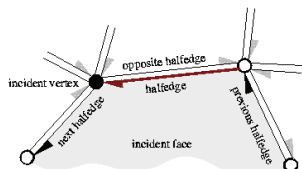
OFF
40 95 75
-0.175114 -0.047799 -0.046492
-0.199566 0.738914 -0.064795
-0.910689 0.674496 0.088980
-0.915538 0.153071 0.107488
-0.970148 0.767894 -0.116107
-0.953836 -0.782815 0.109714
-0.162416 -0.785481 0.088814
-0.113365 -0.782492 0.135482
-0.240928 0.031451 0.031966
-0.259289 0.208557 0.035420
0.296891 -0.707385 0.143375
-0.190129 -0.059002 0.109358
-0.910148 0.024179 -0.067283
-0.112968 -0.089127 0.092391
-0.185828 0.377372 -0.111155

3 29 4 1
3 34 11 13
3 12 30 0
3 30 13 17
3 23 22 21
3 29 38 17
3 32 0 13
3 14 0 37
3 24 4 21
3 14 32 1
3 24 2 22
3 3 12 25
3 4 24 15
3 21 15 26
3 35 34 13
3 19 32 13
3 19 13 27
    
```

Maillage

## Encodage Halfedge

- Encodage Demi-Arêtes (Halfedge)
- Encodage des arêtes : On retrouve les faces par parcours (variété).
- Ajout/suppression en  $\mathcal{O}(1)$ .



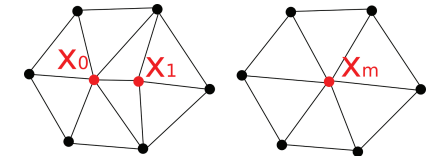
Vertex	Halfedge	Face
Halfedge_handle halfedge()	Halfedge_handle opposite()	Halfedge_handle halfedge()
	Halfedge_handle next()	
	Halfedge_handle prev()	
	Vertex_handle vertex()	
	Face_handle face()	

CGAL

Maillage

## Edge Collapse

- Suppression d'arête (edge collapse) = Base de la simplification de maillage



CGAL

Maillage

## Encodage Halfedge comparaison

Choisir la structure la plus adaptée :

### ■ Tableaux d'indices (vecteurs contigus)

- + Simple, général, adapté GPU.
- + Accès aléatoire  $\mathcal{O}(1)$ .
- Parcours voisinage en  $\mathcal{O}(N)$ .
- Ajout/Suppression  $\mathcal{O}(N)$ .

### ■ Halfedge

- + Parcours voisinage en  $\mathcal{O}(1)$ .
- + Ajout/Suppression en  $\mathcal{O}(1)$ .
- Technique, variété uniquement, encodage non contigu.
- Accès aléatoire en  $\mathcal{O}(N)$ .

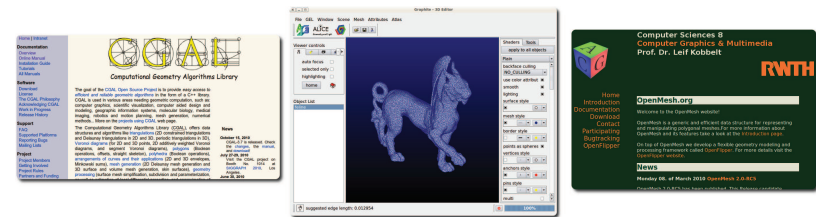
```
Halfedge_handle g = h->next()->opposite()->next();
P.split_edge( h->next());
P.split_edge( g->next());
P.split_edge( g);
h->next()->vertex()->point() = Point( 1, 0, 1);
g->next()->vertex()->point() = Point( 0, 1, 1);
g->opposite()->vertex()->point() = Point( 1, 1, 0);
Halfedge_handle f = P.split_facet( g->next(),
                                   g->next()->next()->next());
Halfedge_handle e = P.split_edge( f);
e->vertex()->point() = Point( 1, 1, 1);
P.split_facet( e, f->next()->next());
```

Maillage

## Subdivision

Maillage

## Librairies implémentant le Halfedge

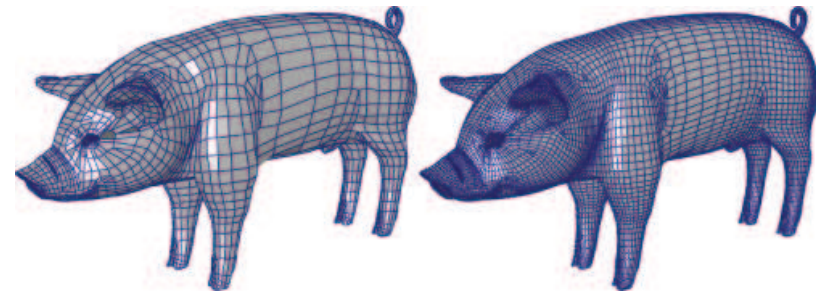


- CGAL (C++ complexe, calcul exact, beaucoup d'algos)
- Graphite (remaillage, paramétrisation, GUI)
- OpenMesh (plus simple que CGAL, moins complet)

Maillage

## Subdivision de maillage

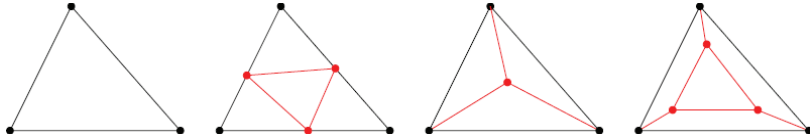
- Raffiner pour : rendu, calcul, déformer, ...
- Voir cours SIGGRAPH



Maillage

## Subdivision de maillage

- Subdivision de la connectivité.
- Plusieurs possibilités de subdivision.

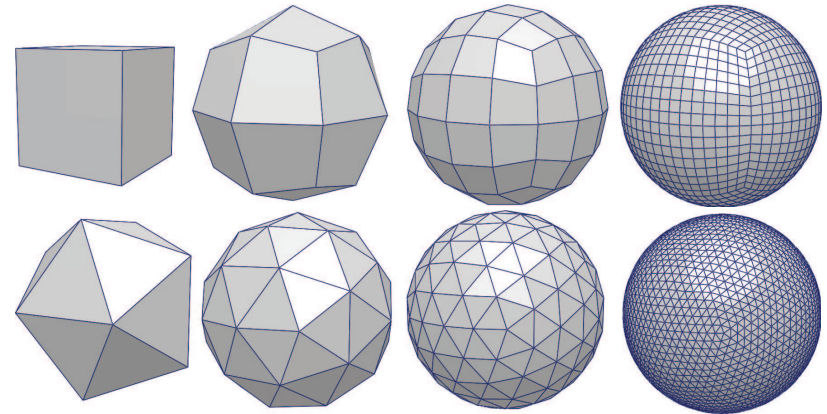


- Présences de polygones quelconques ...
- Structure de données !
- Géométrie
  - Schémas interpolants
  - Schémas approximants

Maillage

## Subdivision de maillage

- Application à la génération d'une sphère par projection :

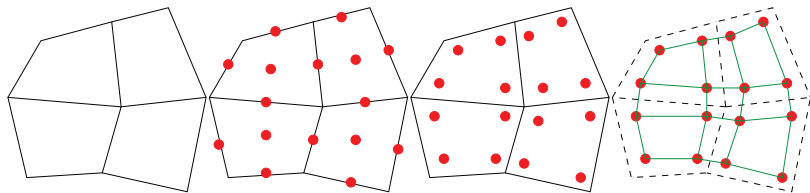


Maillage

## Subdivision

Exemple : Doo-Sabin

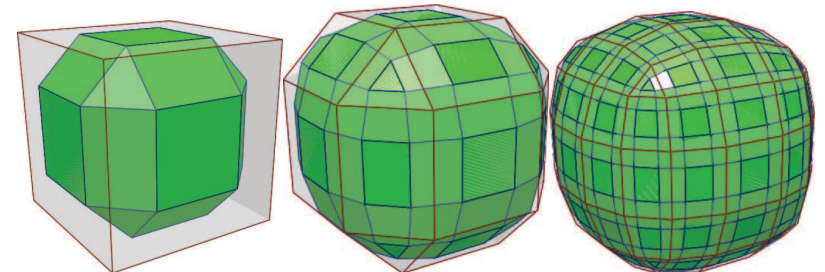
- 1 Soit une face formée par  $(x_i)_{i=0, N-1}$ .
- 2 Construit sommets milieu  $m_i = (x_i + x_{i+1})/2$ .
- 3 Barycentre de la face  $b = (\sum_i x_i)/N$ .
- 4 Nouveaux sommets =  $n_i = (x_i + m_i + m_{i-1} + b)/4$ .



Maillage

## Subdivision

Exemple : Doo-Sabin

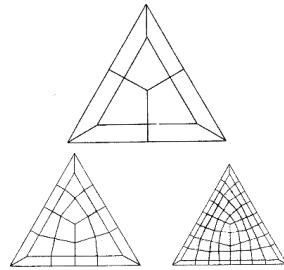


Maillage

## Catmull-Clark

- Un sommet de face = barycentre de l'ancienne face
- Un sommet d'arête = moyenne entre le milieu des anciens sommets et le milieu des faces partageant l'arête
- Nouvelle position du sommet =  $\frac{Q+2R+S(n-3)}{n}$

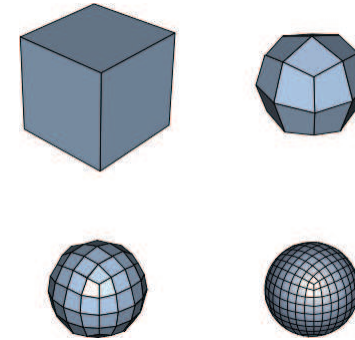
- Q : Moyenne des sommets de face adjacents
- R : Moyenne des points milieux des arêtes incidentes
- S : Anciennes coordonnées
- n : valence



Maillage

## Catmull-Clark Resultats

- $C^2$  sauf au sommets extra-ordinaires
- Schema d'approximation
- Subdivision de face
- Basé de préférence sur des quads

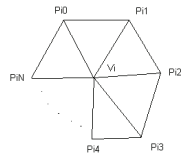


Maillage

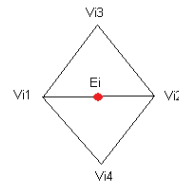
## Loop

### Maillage Triangulaire

- Nouvelle Position



- Sommets d'arêtes



$$V^{i+1} = (1 - n\alpha)V^i + \alpha \sum_{k=0}^n P_k$$

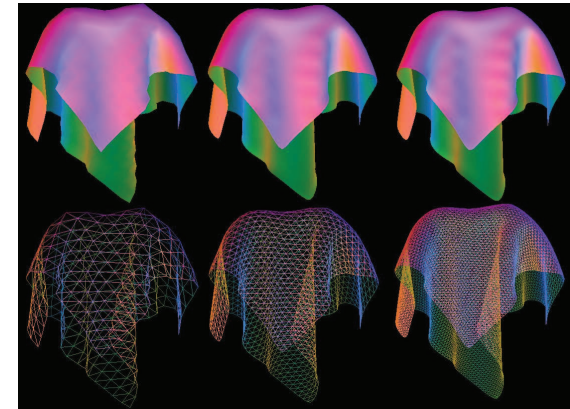
$$\alpha = \frac{1}{n} \left( \frac{5}{8} - \left( \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \cos \left( \frac{2\pi}{n} \right) \right)^2 \right)$$

$$E^{i+1} = \frac{3}{8}(V_1 + V_2) + \frac{1}{8}(V_3 + V_4)$$

Maillage

## Loop

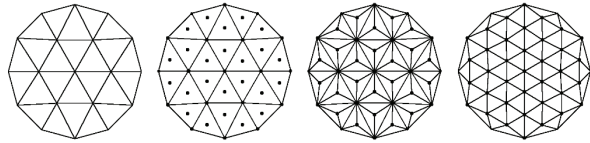
- $C^2$  sauf au sommets extra-ordinaires
- Schema d'approximation
- Subdivision de face
- Subdivision de triangles



Fisher

Maillage

Maillage Triangulaire

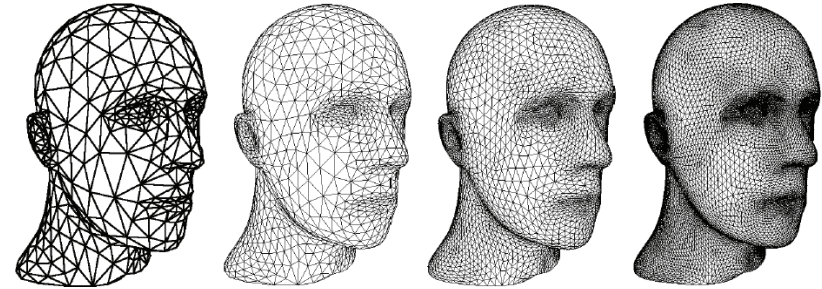


- Nouveaux sommets : barycentre de l'ancienne face
- Nouvelle position du sommet  $i$  :

$$(1 - \alpha_n)\rho_i + \frac{\alpha_n}{n} \sum_{j \in \mathcal{V}_i} \rho_j \quad (n=\text{valence}, \mathcal{V}=\text{voisinage})$$

$$\text{et } \alpha_n = \frac{4 - 2 \cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)}{9}$$

- $C^2$  sauf au sommets extra-ordinaires
- Schema d'approximation
- Subdivision de face
- Subdivision de triangles

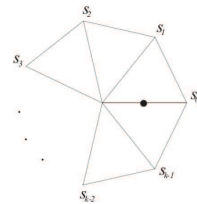
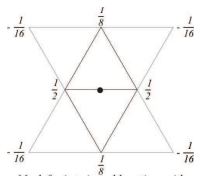


[Kobbelt, SIGGRAPH 00]

Butterfly

Maillage Triangulaire

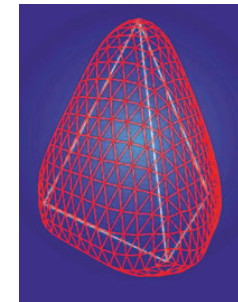
- Sommet régulier
- Sommet non régulier



- Ajout d'un point par coté
- Dans le cas d'un sommet non régulier :
  - $s_i = \frac{1}{k} \left( \frac{1}{4} + \cos\left(\frac{2\pi}{k}\right) + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{4\pi}{k}\right) \right)$  pour  $k > 5$
  - $s_0 = \frac{5}{12}, s_{1,2} = -\frac{1}{12}$  pour  $k = 3$
  - $s_0 = \frac{3}{8}, s_2 = -\frac{1}{8}, s_{1,3} = 0$  pour  $k = 4$ .

Butterfly

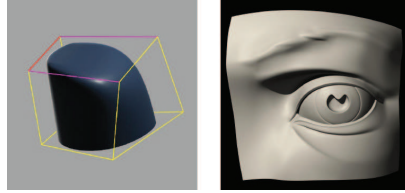
- $C^1$  sauf au sommets extra-ordinaires
- Schema d'interpolation
- Subdivision de face
- Subdivision de triangles



## Subdivision : Arêtes vives

- Ne pas lisser toutes les arêtes :

[De Rose, Kass, Truong.  
**Subdivision Surfaces in Character Animation.** *ACM SIGGRAPH*. 1998]



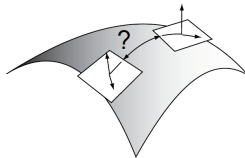
©Pixar, Gery's Game

Maillage

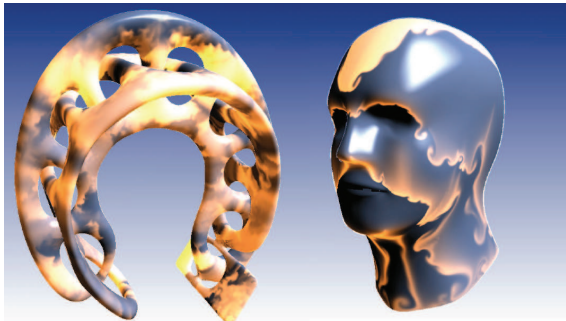
## Lissage Laplacien

- Soit  $f$  définie sur une variété différentielle (surface lisse).

$$f : \begin{cases} \Gamma & \rightarrow \mathbb{R}^N \\ (\xi_1, \xi_2) & \mapsto f(\xi_1, \xi_2) \end{cases}$$



- Calcul différentiel ?
- Problème : Comparer vecteurs dans différents espaces



Maillage

## Lissage Laplacien

Maillage

## Calcul différentiel sur variété

- Opérateur de Laplace-Beltrami = Laplacien sur une variété

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\det(I_\Gamma)}} \sum_i \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left( \sqrt{\det(I_\Gamma)} \sum_j I_\Gamma^{ij} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \right)$$

- Cas particulier : Laplacien des propres coordonnées !  
 $f = \mathbf{x}(\xi_1, \xi_2) = (x(\xi_1, \xi_2), y(\xi_1, \xi_2), z(\xi_1, \xi_2))$
- $\text{Sp}(\Delta \mathbf{x}) =$  **modes de vibrations propres** = Base de Fourier  
*Théorie Spectrale*



[Vallet, Levy, Eurographics 08]

Maillage

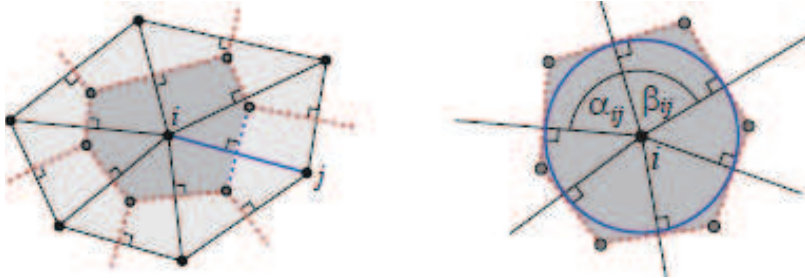
## Lissage Laplacien

- Filtre passe bas = Convolution par filtre Gaussien en 2D = Solution de l'équation de diffusion (voir *Scale Space theory*).

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \Delta x$$

- Comment approximer  $\Delta$  sur un maillage ?  
⇒ Plusieurs solutions, aucune parfaite.

[Wardetzky, Mathur, Kalberer, Grinspun. **Discrete Laplace Operators : No Free Lunch.** SGP 07]

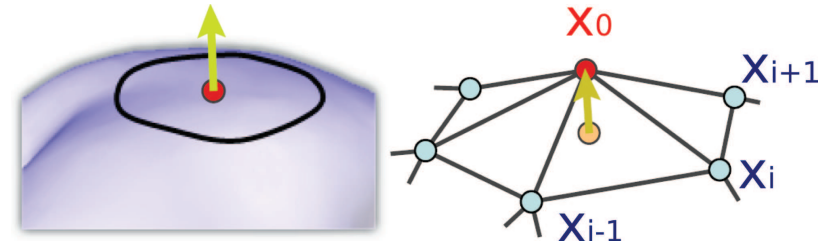


Maillage

## Lissage Laplacien

- Approximation la plus simple :

$$\Delta x(x_0) \simeq \frac{1}{N} \sum_i (x_i - x_0) = \bar{x} - x_0$$



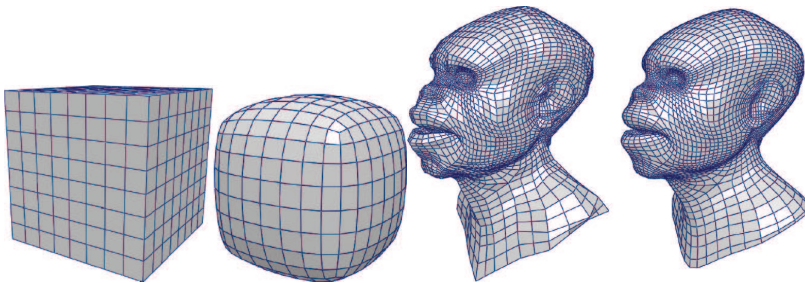
[Sorkine, Eurographics 05]

Maillage

## Lissage Laplacien

- Algorithme du lissage laplacien :

$$x^{k+1} = \mu \bar{x} + (1 - \mu)x^k$$



Maillage