

Compression de maillages

F. Dupont



SOURCES DE DONNÉES 3D

Application dans le domaine médical

- × Radiographie (tomo-densitométrie ou Scanner)
- × Échographie (échetomographie ou échographie Doppler)
- × RMN (résonance magnétique nucléaire)
- × Imagerie nucléaire (scintigraphie, PET ou SPECT)

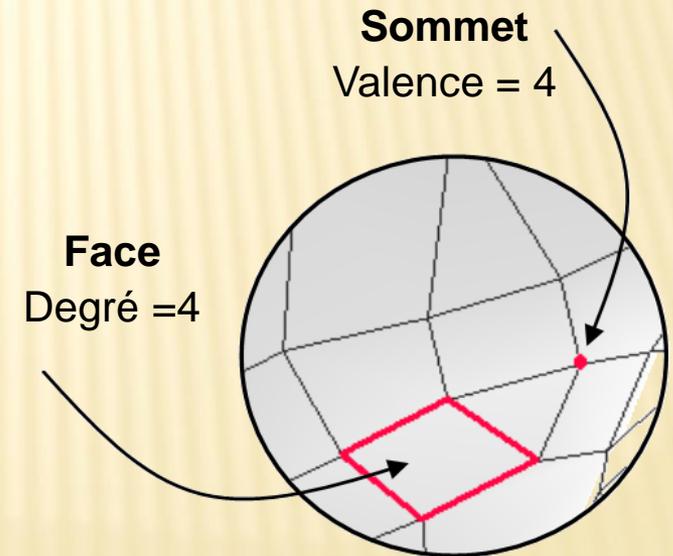
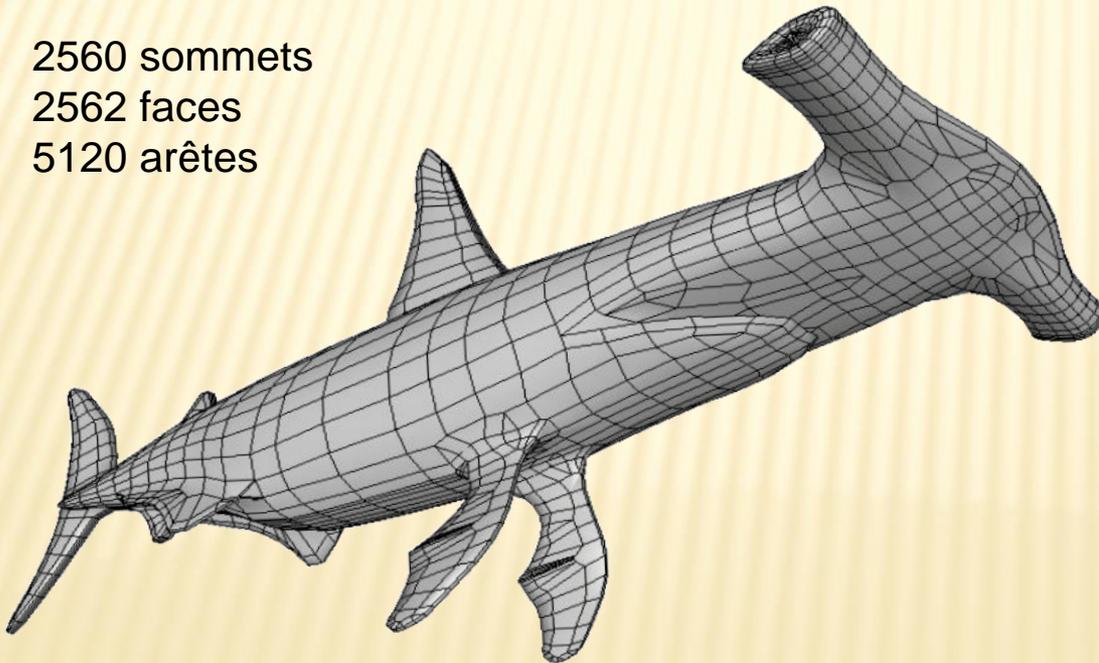
Application dans d'autres domaines

- × Domaines des sciences de la Terre :
Océanographie, géophysique, sismologie ou la météorologie
- × Industrie : techniques de contrôle non destructif (CND)
- × Industrie : conception assistée par ordinateur, calcul scientifique

LES MAILLAGES POLYGONAUX

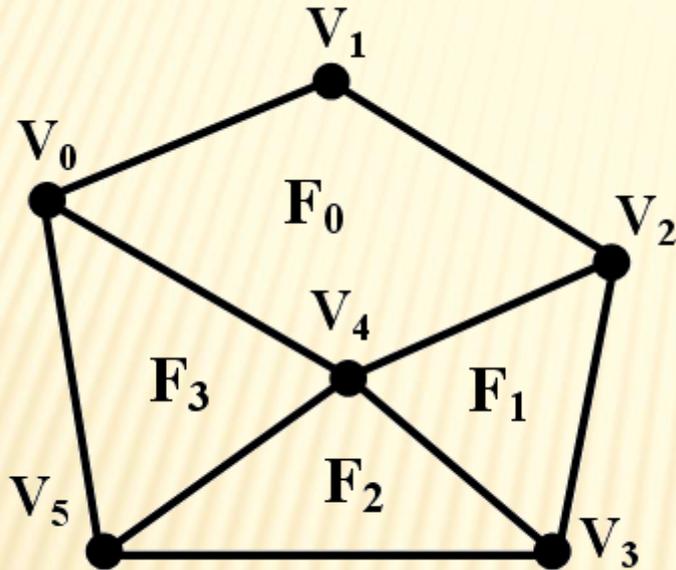
- ✗ **Le maillage polygonal, représentation 3D la plus utilisée :**
 - + Scan 3D
 - + CAO
 - + Rendu réaliste...
- ✗ **Visualisation surfacique**

2560 sommets
2562 faces
5120 arêtes



LES MAILLAGES POLYGONAUX

- ✗ Il faut coder la **géométrie** et la **connectivité**



Géométrie	
V_0	$x_0 y_0 z_0$
V_1	$x_1 y_1 z_1$
V_2	$x_2 y_2 z_2$
V_3	$x_3 y_3 z_3$
V_4	$x_4 y_4 z_4$
V_5	$x_5 y_5 z_5$

Connectivité	
F_0	0 1 2 4
F_1	4 2 3
F_2	4 3 5
F_3	0 4 5

Par facette :
4 octets
× n indices

Par sommet :
4 octets
× 3 coordonnées

LES MAILLAGES POLYGONAUX

× Pour une surface orientable :

$s - a + f = 2c - 2g + t$ (relation d'Euler-Poincaré) où :

- s , a et f sont respectivement le nombre de sommets, le nombre d'arêtes et le nombre de faces
- c le nombre de composantes connexes
- g le genre de la surface
- t le nombre de trous sur la surface

× Exemple :

- Une sphère : $c=1$, $g=0$, $t=0$ donc $s-a+f = 2$
- Un tore : $c=1$, $g=1$, $t=0$ donc $s-a+f = 0$

LES MAILLAGES POLYGONAUX

✗ Pour un maillage triangulaire

+ $3f = 2a$, $a=3s-6 \rightarrow f \approx 2s$ (si s grand)

+ Somme des valences = $2a = 6s-12 \rightarrow$ Valence moyenne = 6 (si s grand)

Maillage triangulaire

36 octets / sommet

288 bits / sommet

✗ Pour un maillage quadrangulaire

+ $4f = 2a \rightarrow f \approx s$, $a \approx 2s$

+ Valence moyenne = 4

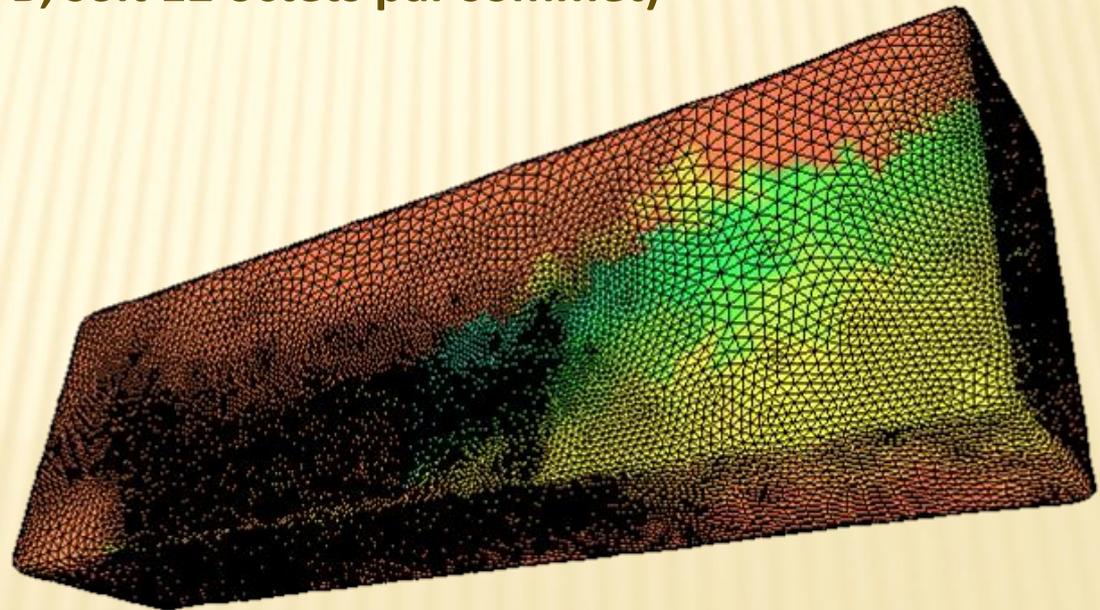
Maillage quadrangulaire

24 octets / sommet

192 bits / sommet

LES MAILLAGES POLYGONAUX AVEC ATTRIBUTS

- ✗ **Attributs : grandeur scalaire, vecteur...**
 - ✗ **Exemple : maillages colorés**
 - + Très utilisés en calcul scientifique
 - + Attributs attachés aux sommets ou facettes (couleur, normale, texture...) nécessitent également d'être compressés
- Exemple (couleur RVB, soit 12 octets par sommet)



PLAN

- × **Compression de maillages statiques**

- + Méthodes mono-résolution

- + Méthodes multi-résolution

- × **Compression de maillages dynamiques**

COMPRESSION MONO-RESOLUTION

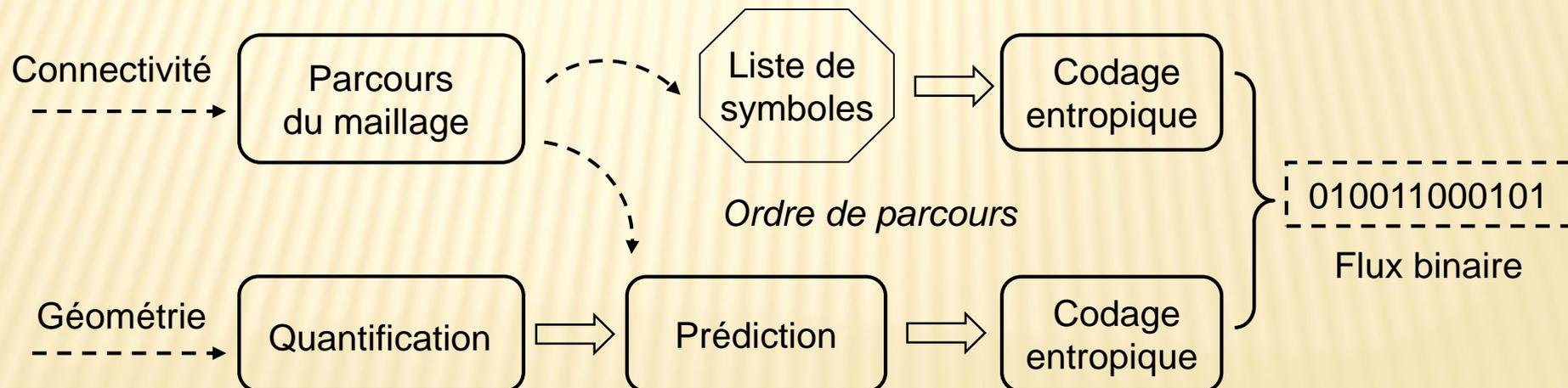
✗ Il faut coder la connectivité et la géométrie

+ Codage de la connectivité

- ✗ Génération d'un parcours sur le graphe du maillage
- ✗ Codage des symboles correspondants

+ Codage de la géométrie

- ✗ Quantification des coordonnées
- ✗ Prédiction



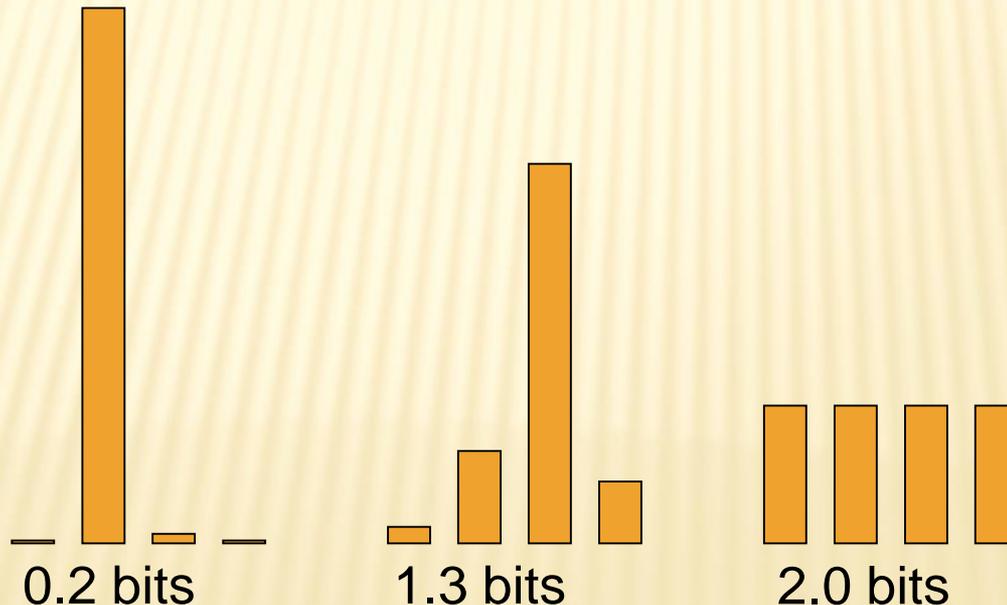
COGAGE ENTROPIQUE

✦ Rappel : pour une séquence de n symboles différents

$$\text{Entropie(en bits)} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2\left(\frac{1}{p_i}\right)$$

p_i : probabilité d'apparition de chaque type de symbole

Exemple :



APPROCHES GUIDÉES PAR LA CONNECTIVITÉ

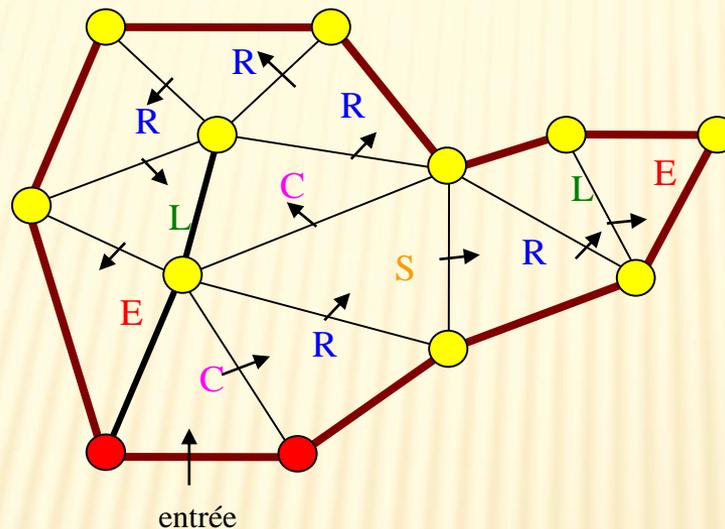
APPROCHE CONNECTIVITÉ

- ✗ Ensemble de bandes de triangles généralisées [Deering, 1995]
 - + Première méthode de compression de maillages
- ✗ Séquence d'indices de sommets
un symbole L ou R pour suivre l'évolution du bord de la bande



APPROCHE CONNECTIVITÉ

- ✗ Approche "chirurgie topologique" [Rossignac, 1998]
 - + un arbre couvrant de sommets pour découper le maillage
 - + Un arbre pour décrire chaque partie

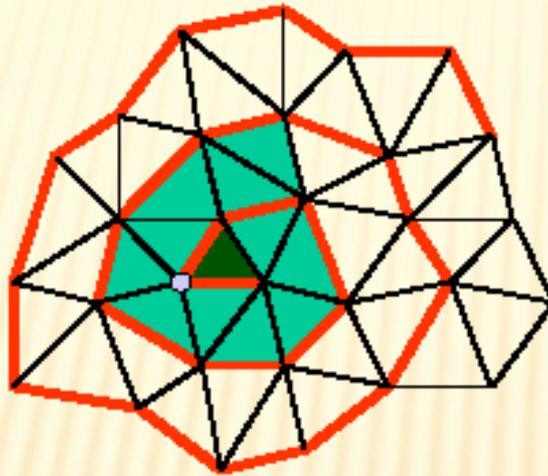


CRSRLECRRRLE

- ✗ En sortie, on obtient une liste de symboles → Codage entropique

APPROCHE CONNECTIVITÉ

- ✗ **Spirales de triangles [Bajaj, 1999]**
 - + Décomposition concentrique en plusieurs couches de sommets et plusieurs couches de triangles.



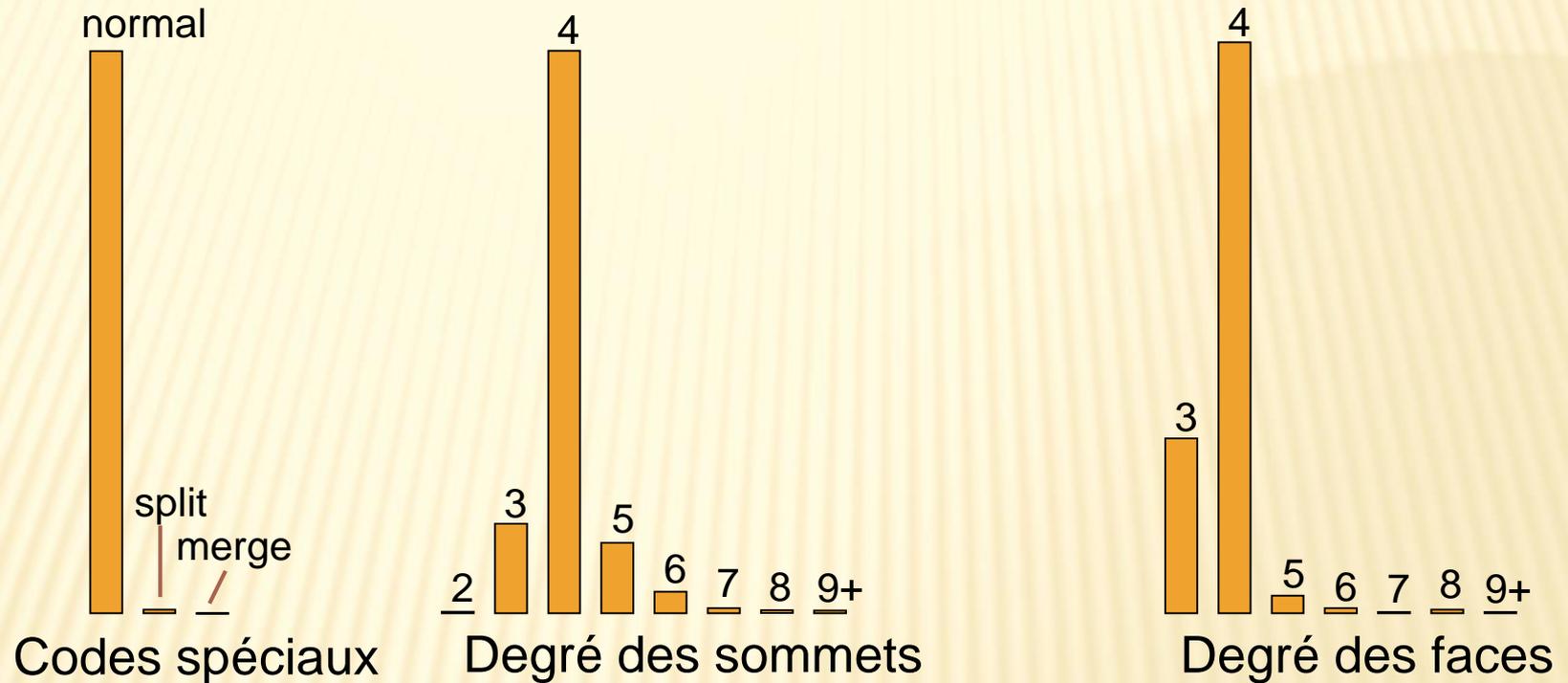
APPROCHE CONNECTIVITÉ

- × Algorithme de référence : [Touma & Gostman, 1998]
- × Exploite la distribution non uniforme des degrés des faces.
- × La séquence d'indices est transformée en une liste de degrés de face, plus quelques symboles « accidentels ».

- × Triangle germe choisi arbitrairement, les 3 sommets sont mis dans une liste chaînée de sommets
- × Puis croissance de région :
 - + Mise à jour de la liste avec ajout et suppression de sommets
 - + Ajout de codes liés à la valence des sommets et code spéciaux (*Split* et *Merge*)
 - + Ajout de codes liés au degré des faces
- × Codage arithmétique

APPROCHE CONNECTIVITÉ

✗ [Touma & Gostman, 1998]



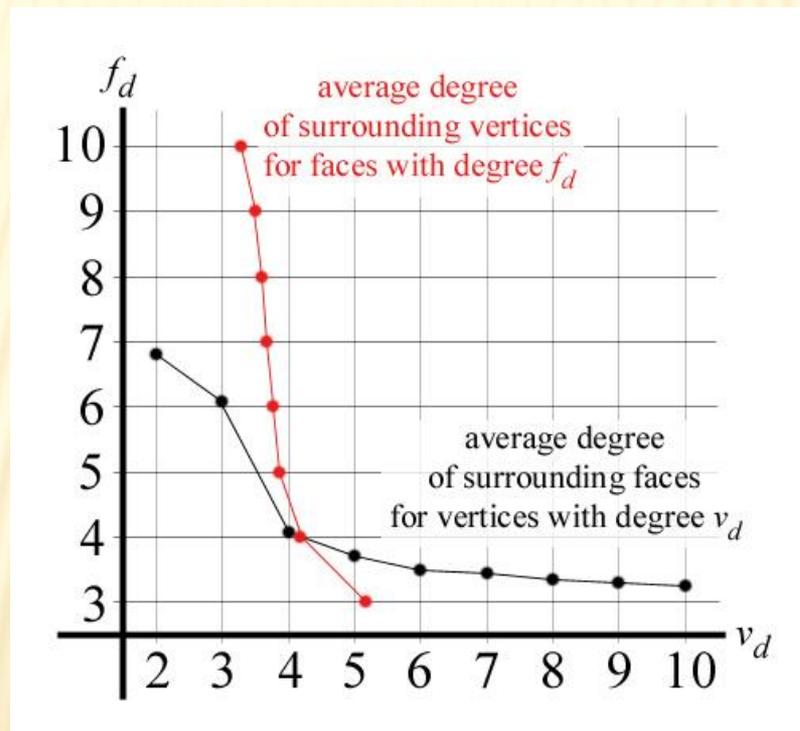
✗ Dans le pire cas :

- + [Alliez & Desbrun, 01] 3.241... bpv
- + Résultats de codage sur les graphes planaires [Tutte, 1962]

APPROCHE CONNECTIVITÉ

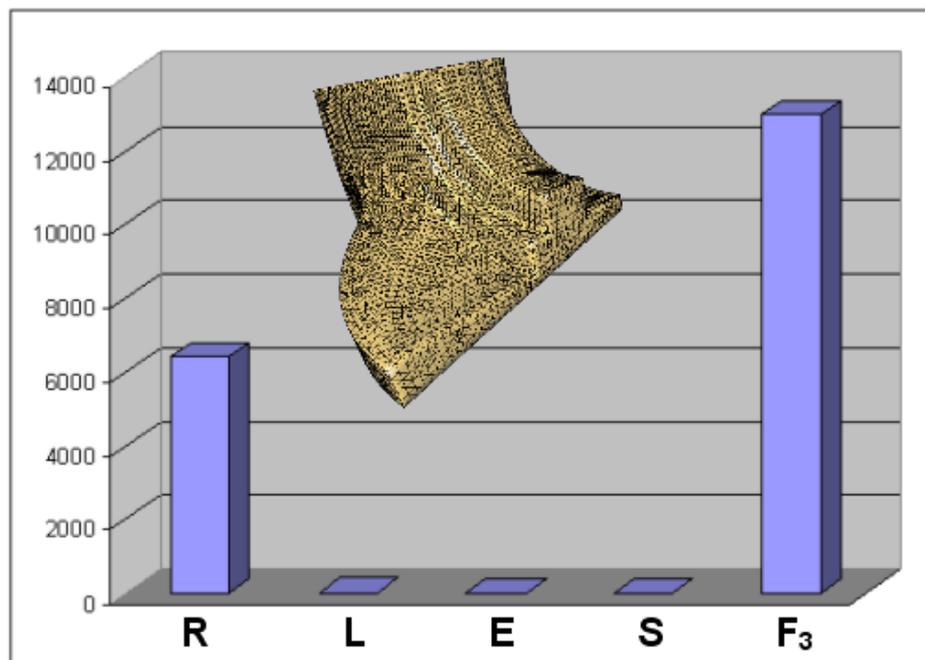
✘ Degree Duality Prediction [Isenburg et al., 2002]

- + Des faces de degré élevé sont probablement entourées de faces de degré faible → prédiction mutuelle

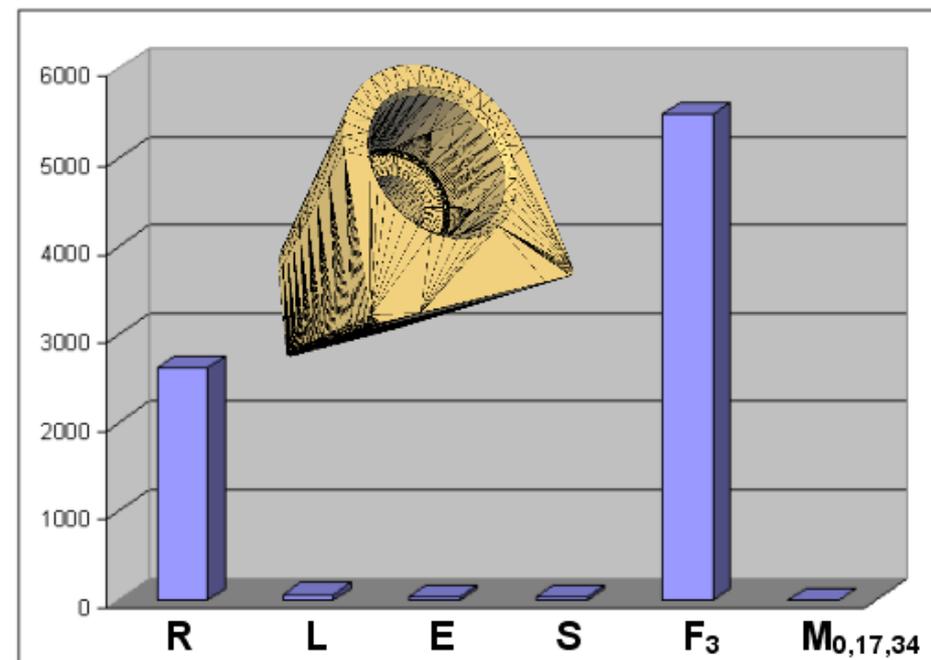


APPROCHE CONNECTIVITÉ

- ✗ **Distribution des symboles très déséquilibrée**
=> Codage entropique efficace (0,8 bits / symbole)



Fandisk (6495 vertices)

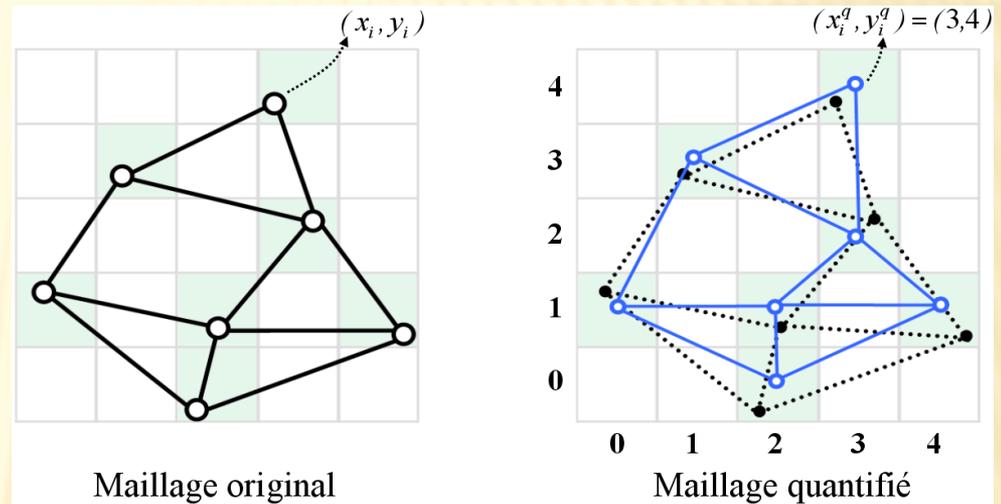
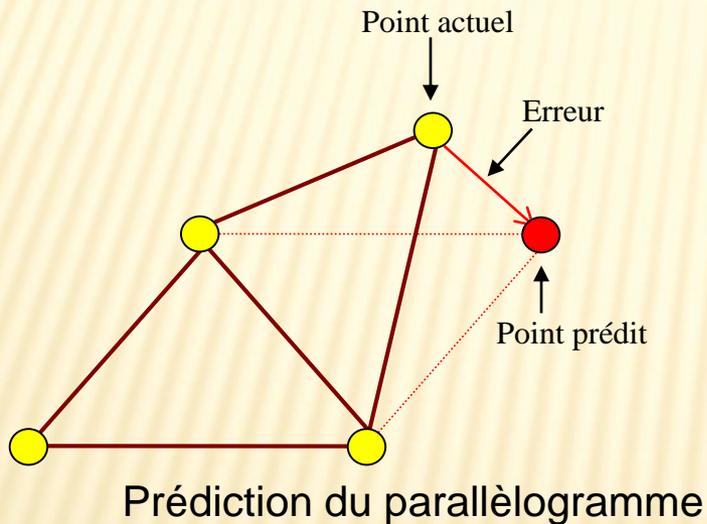


Swivel (2743 vertices)

CODAGE DE LA GÉOMÉTRIE

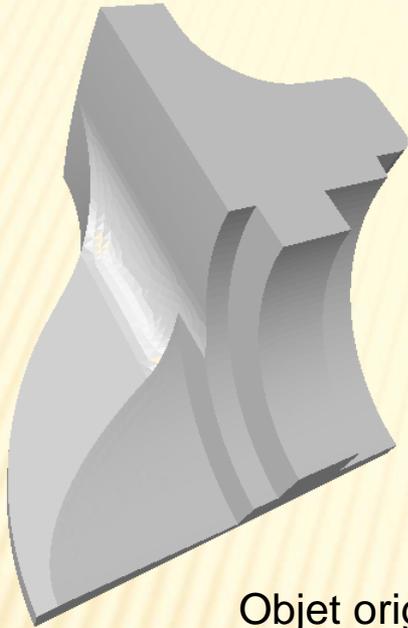
CODAGE DE LA GÉOMÉTRIE

- × Codage de la géométrie
 - × Quantification
 - × Prédiction
 - × Codage entropique

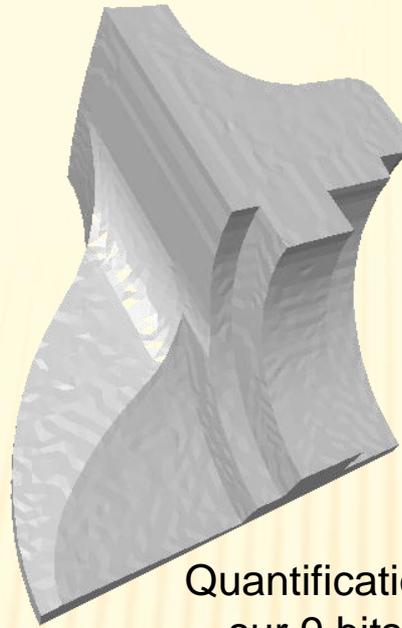


Quantification uniforme sur une grille 5×5

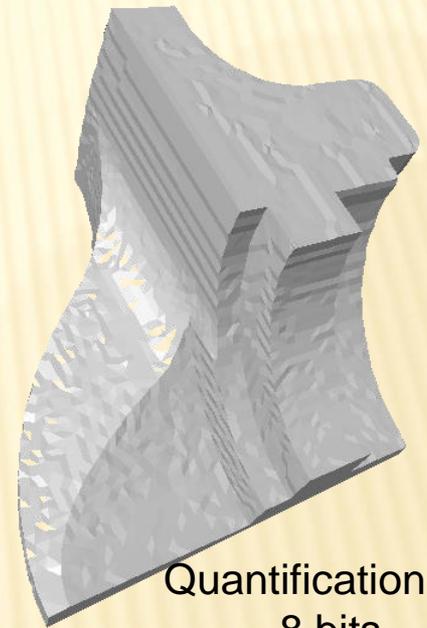
QUELQUES EXEMPLES DE RÉSULTATS



Objet original



Quantification
sur 9 bits



Quantification sur
8 bits

Taille binaire sans codage : **234 Ko**

Tailles compressées:

Quantification 12 bits: **19 Ko** => 91.7 %

Quantification 10 bits: **14 Ko** => 94.2 %

Quantification 8 bits: **9 Ko** => 96.3 %

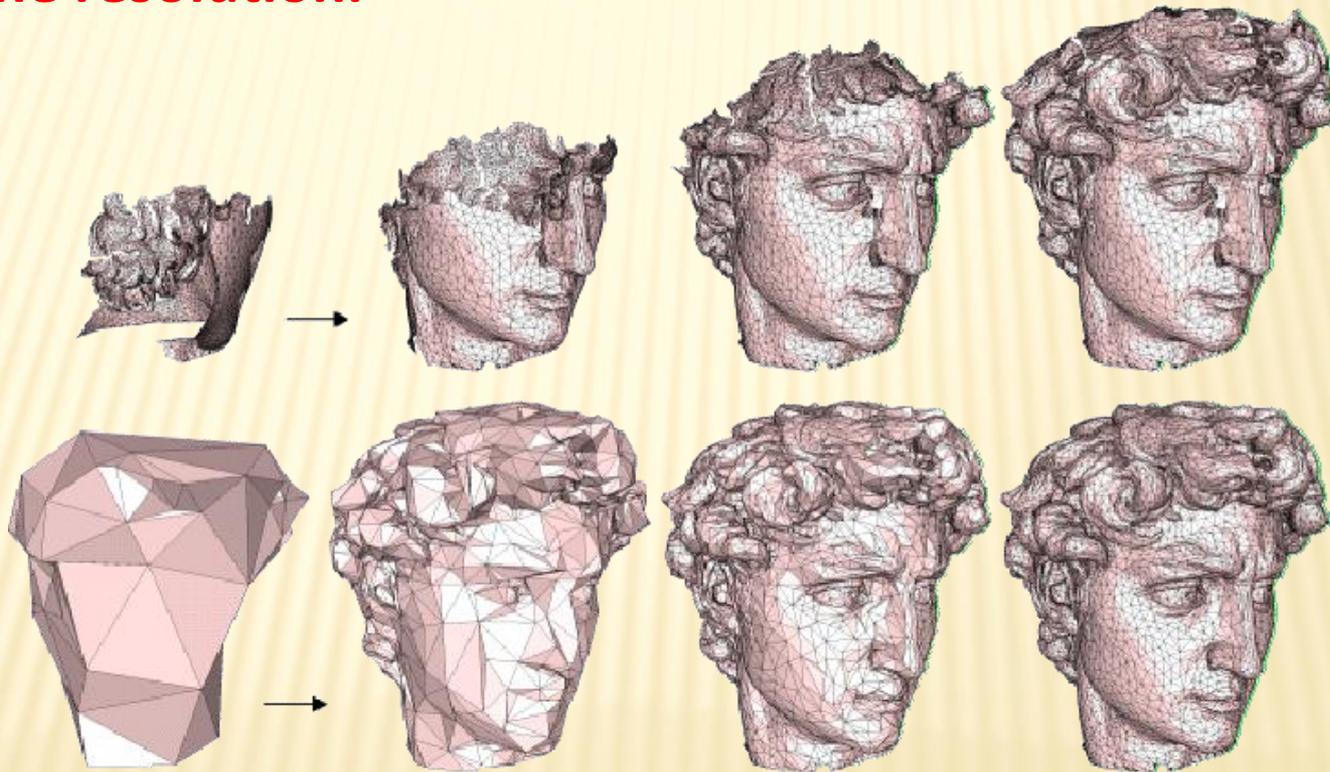
PLAN

- ✗ **Etat de l'art en compression :**
 - + Codage mono-résolution
 - + Codage multi-résolution
 - + Codage par changement de modèle
- + **Compression de maillages dynamiques**

COMPRESSION MULTI-RESOLUTION

✦ Principe:

Transmettre d'abord un maillage simple, puis une séquence d'information de raffinement permettant de reconstruire la pleine résolution.



ETAT DE L'ART

✗ Compression progressive dirigée par la connectivité

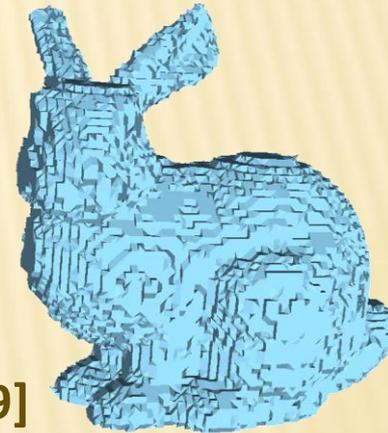
- + Progressive Meshes [Hoppe 1996]
- + Progressive Forest Split [Taubin et al. 1998]
- + Patch Coloring [Cohen-Or et al. 1999]
- + Basée sur la valence [Alliez et Desbrun 2001]
- + Basée sur les ondelettes [Valette et Prost 2004]



[Alliez et Desbrun 2001]
2,1 bits/sommet

✗ Compression progressive dirigée par la géométrie

- + Décomposition en kd-tree [Gandoin et Devillers 2002]
- + Décomposition en octree [Peng et Kuo 2005]



[Peng et Kuo 2005]
2 bits/sommet

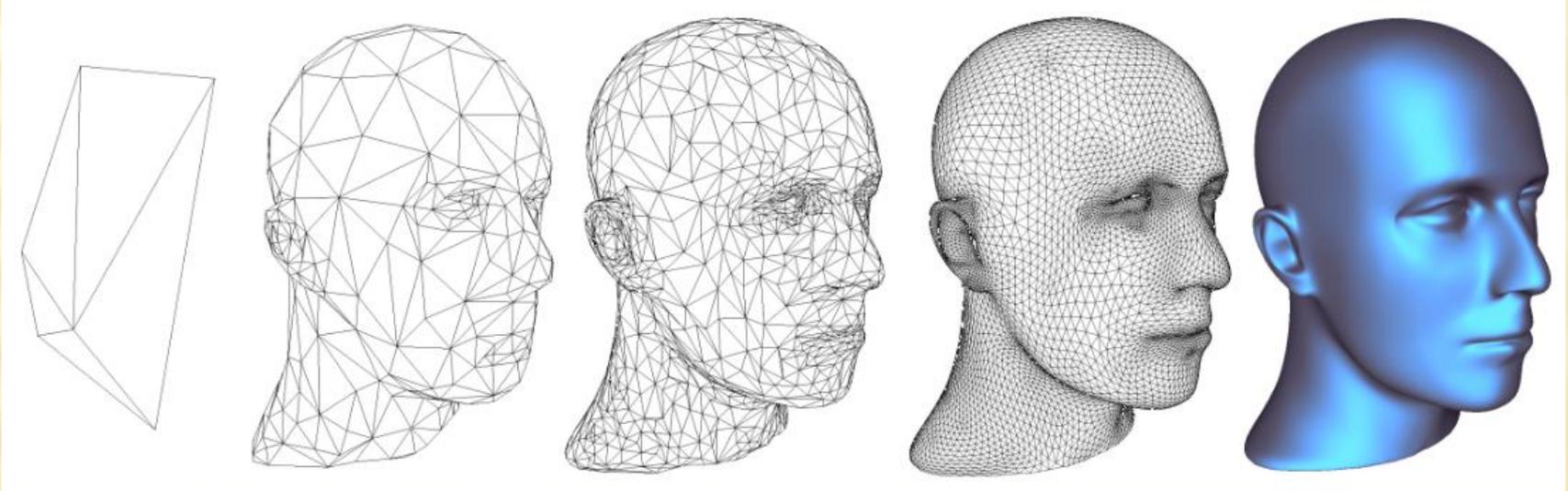
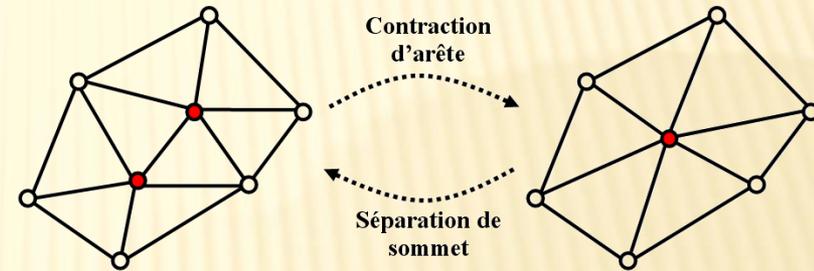
✗ Méthodes plus récentes

- + Incremental parametric refinement (IPR) [Valette et al. 2009]
- + Feature-oriented refinement [Peng et al. 2010]
- + Approximation de la surface [Mamou et al. 2010]
- + Adaptation de la quantification Lee et al.[2011]

COMPRESSION MULTI-RESOLUTION

✗ Par simplification:

Le maillage est simplifié itérativement et les informations nécessaires à l'inversion du processus sont mémorisées



[Alliez, 2001]

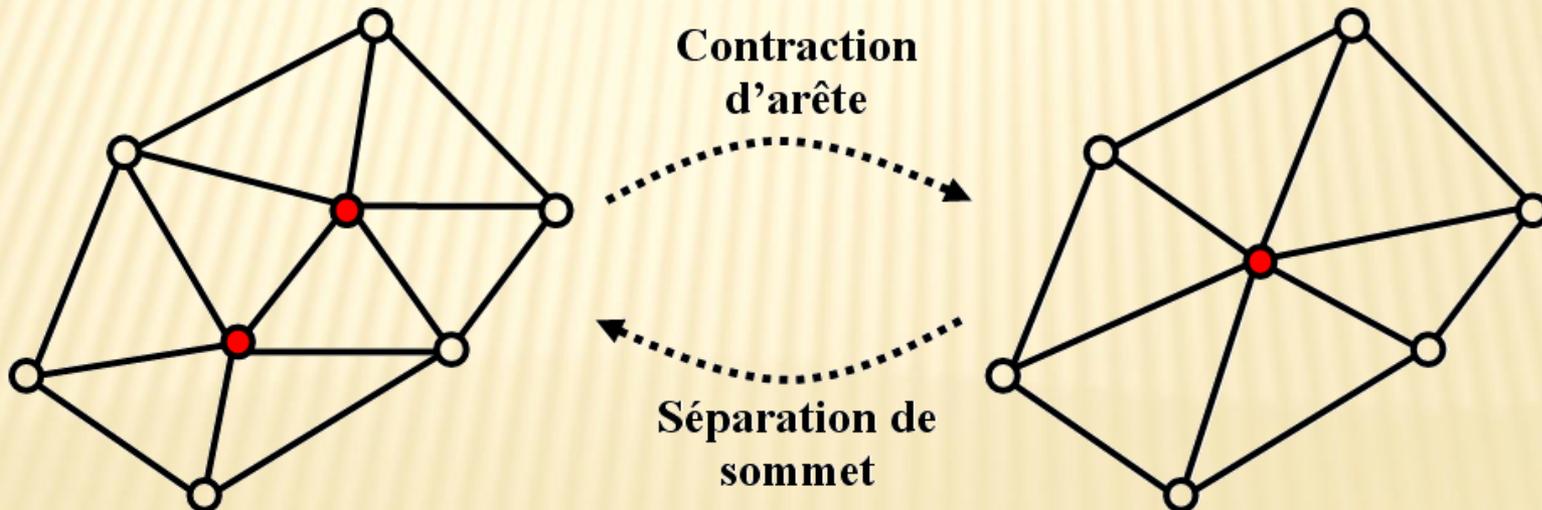
SIMPLIFICATION DE MAILLAGES 3D

✗ Objectif:

Diminuer le nombre de faces et de sommets en gardant un aspect visuel acceptable

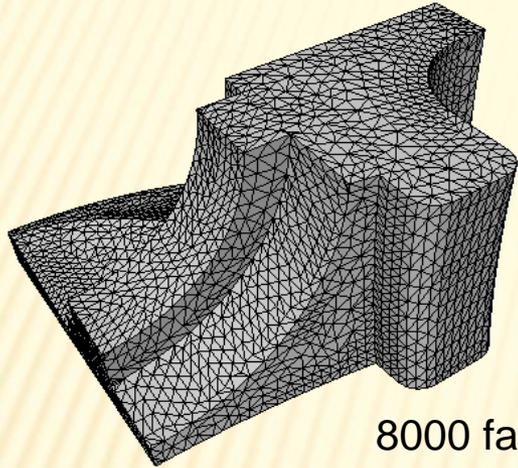
✗ Plusieurs approches

- + Fusion de faces
- + Suppression de sommets (par contraction d'arête)
- + Remaillage (on échantillonne de nouveaux points sur l'objet)

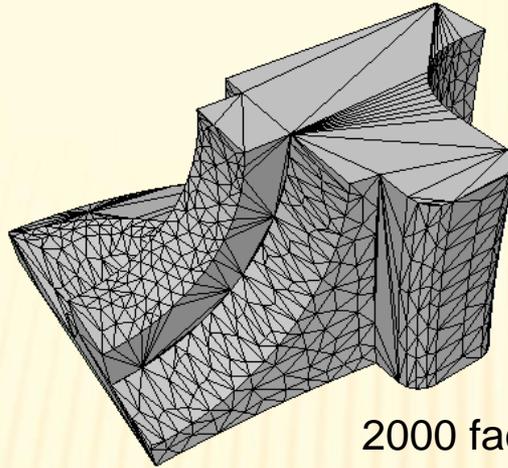


SIMPLIFICATION DE MAILLAGES 3D

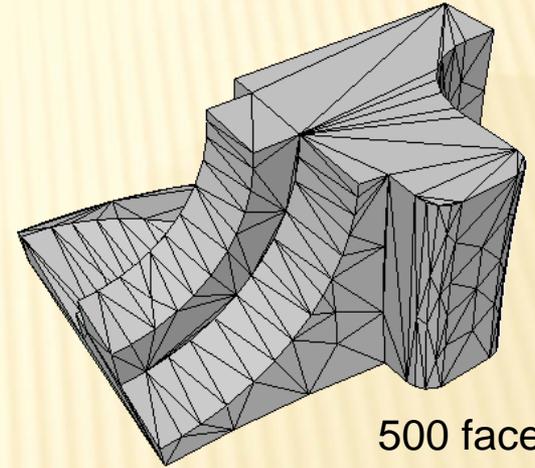
Exemple de simplification du maillage *Fandisk* [Garland, 1997]



8000 faces

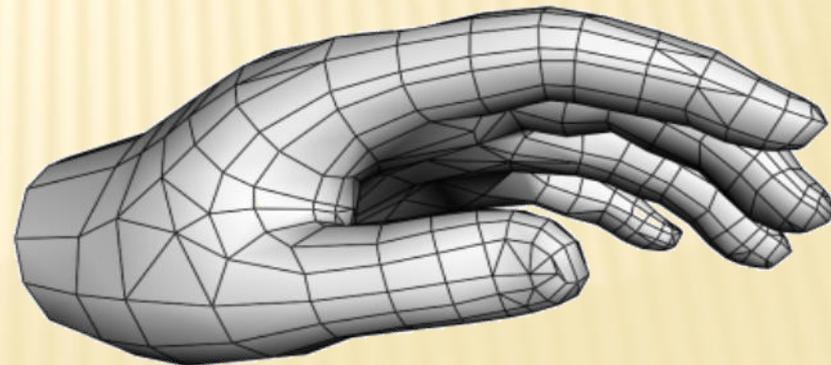
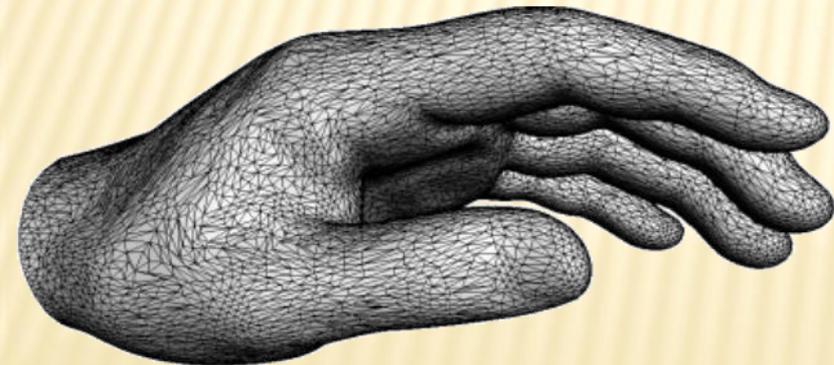


2000 faces

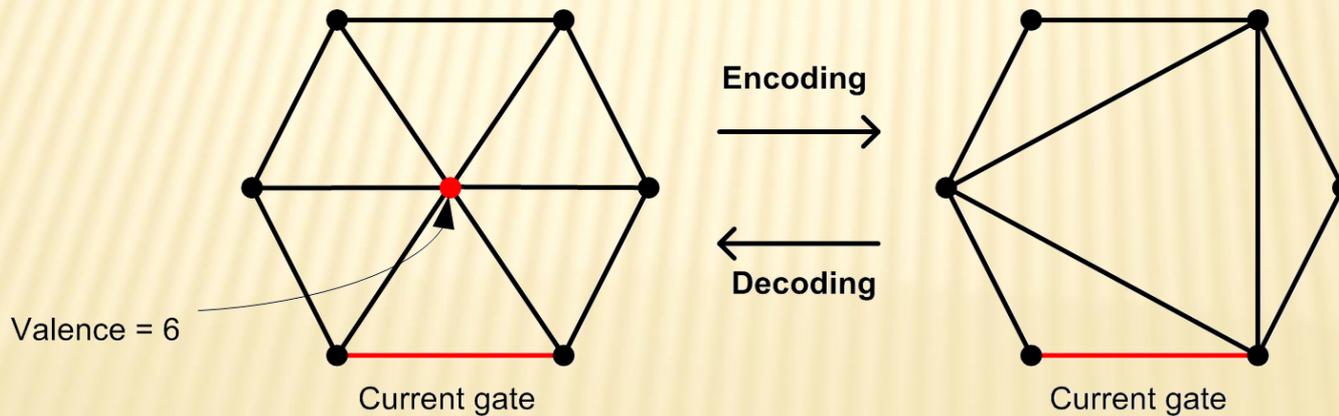
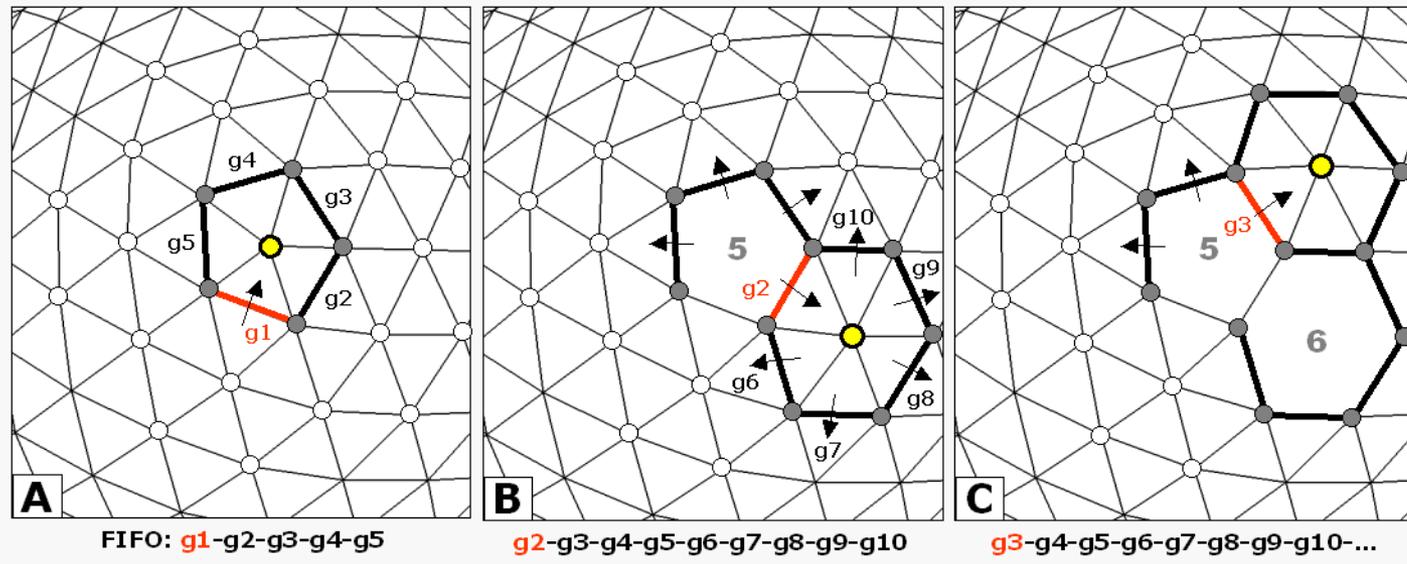


500 faces

Exemple de remaillage du modèle *Hand* [Alliez, 2003]

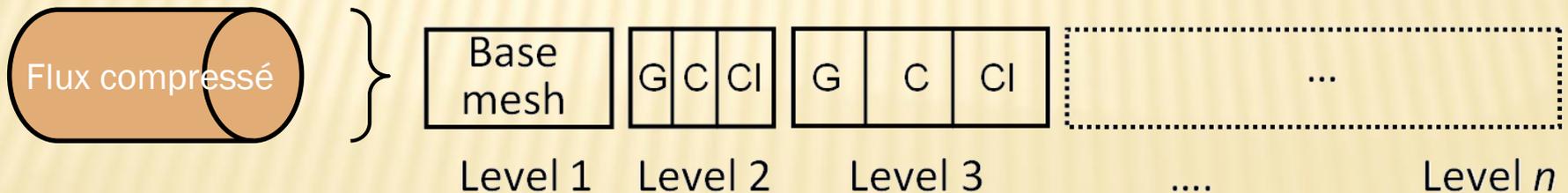
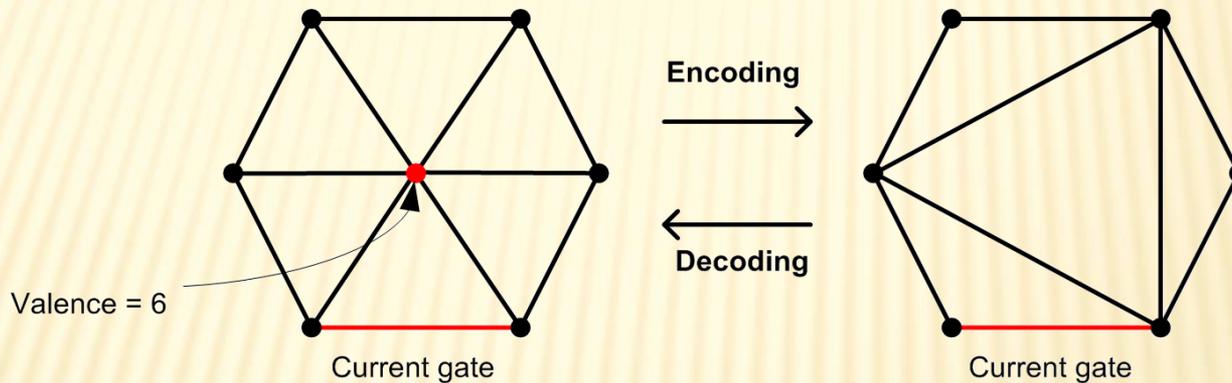


ALLIEZ ET AL. 2001 - CODAGE



ALLIEZ ET AL. 2001 - CODAGE

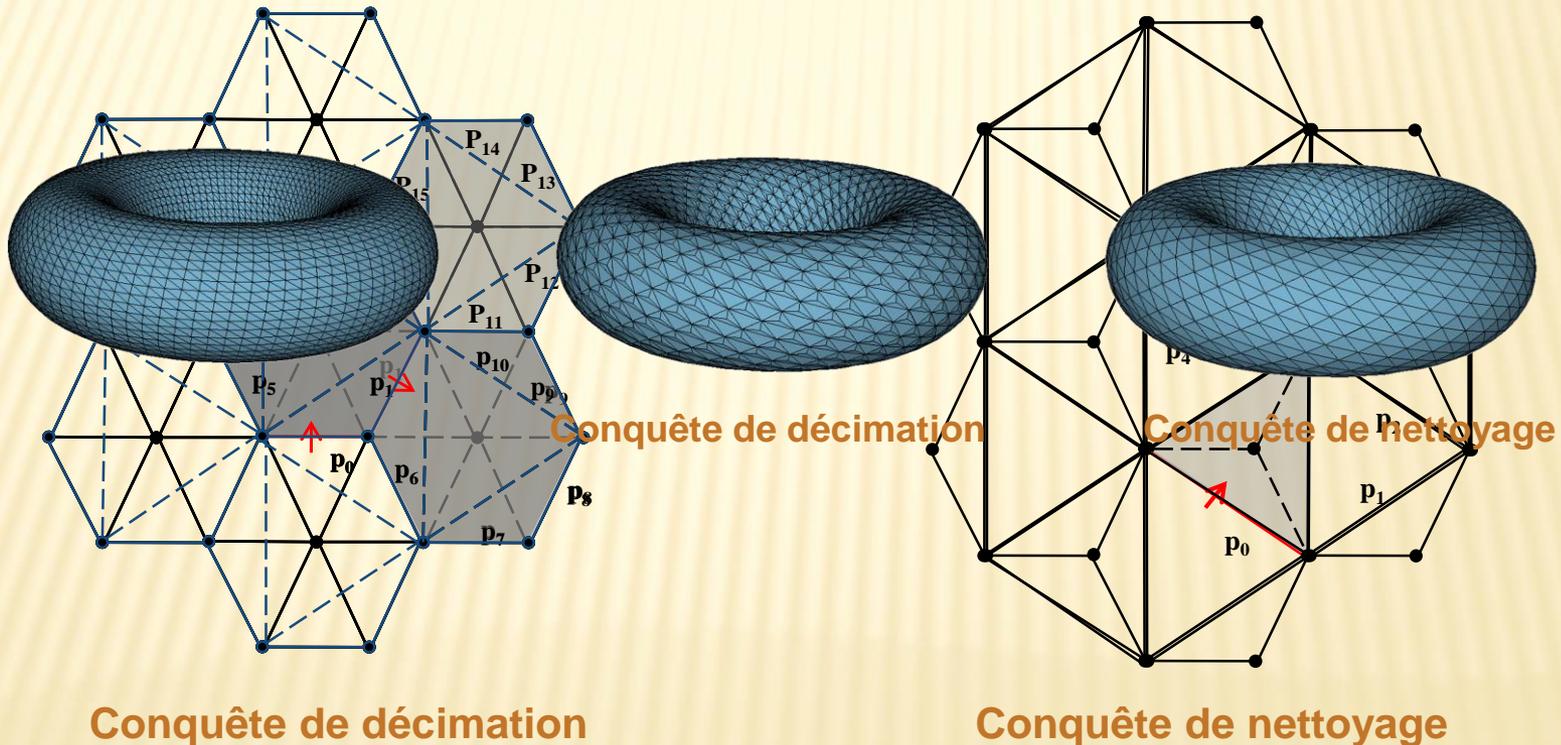
- ✘ A chaque itération de simplification, la connectivité (C), la géométrie (G) et la couleur (Cl) sont encodées
- ✘ Une prédiction barycentrique est utilisée pour prédire la couleur et la géométrie



LEE ET AL. 2011 – ALGORITHME DE BASE

✘ Approche basée sur la valence [Alliez et Desbrun 2001]

- + Basée sur une simplification itérative (parcours de patch en patch)
- + Enlèvement de sommet + retriangulation du patch



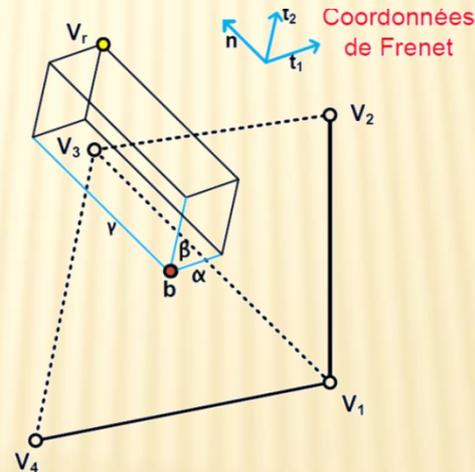
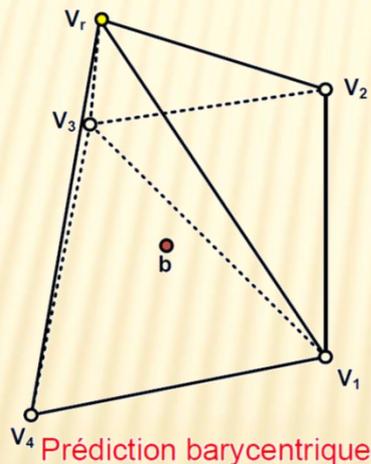
CODAGE

✘ Codage de la connectivité

- + Valence de chaque sommet enlevé + codes incidents

✘ Codage de la géométrie

- + Quantification initiale et globale
- + Prédiction barycentrique
- + Coordonnées de Frenet (composantes tangentielle + normales)



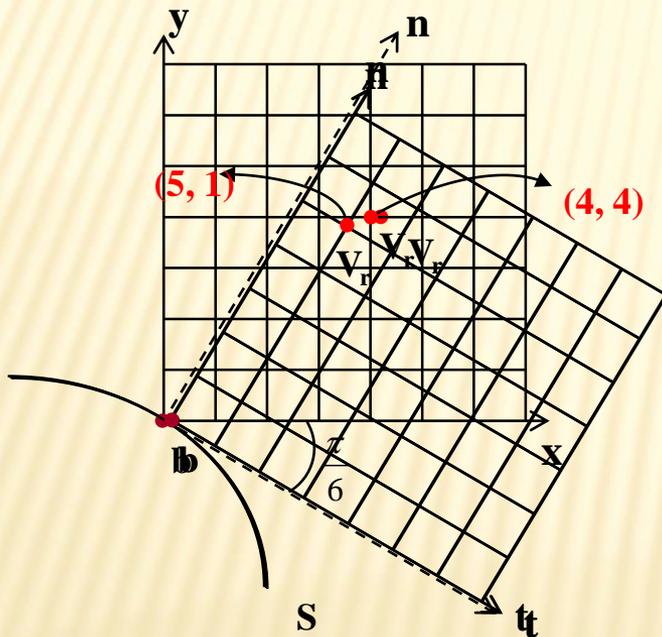
Amélioration basée sur une bijection élimant un surcoût pour la réversibilité lié à la quantification

BIJECTION – CODAGE DE LA GÉOMÉTRIE

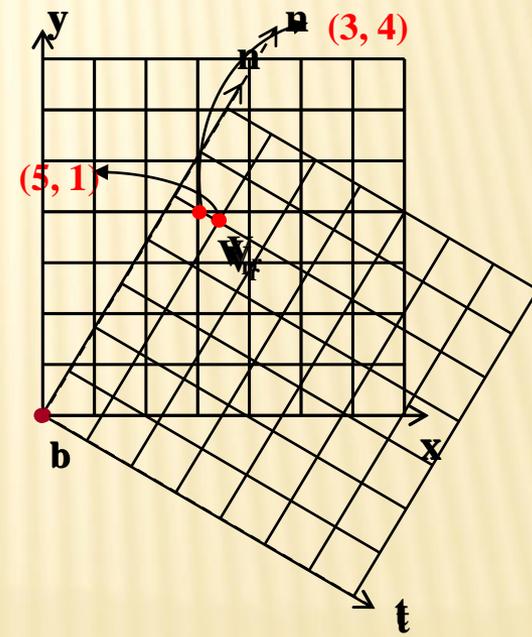
× Coordonnées de Frenet

- + Nombres à virgule flottante
- + Nécessite une quantification supplémentaire → **coût ↑**

Codage



Décodage



Utilisation d'une rotation bijective pour éliminer le surcoût pour la réversibilité lié à la quantification

OPTIMISATION DU COMPROMIS DÉBIT-DISTORSION

✗ Motivation

- + Maillages fins
 - haute précision de quantification
- + Maillages grossiers
 - basse précision de quantification
- + Adaptation de la quantification
 - à chaque niveau de détail (LoD)

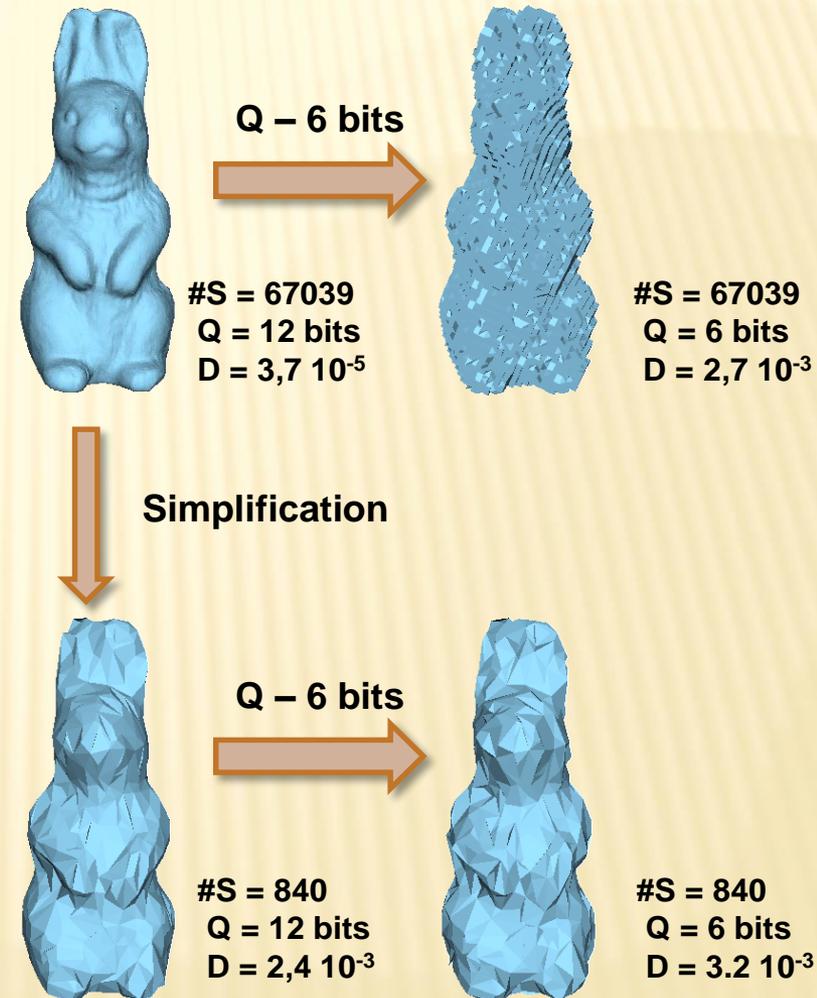
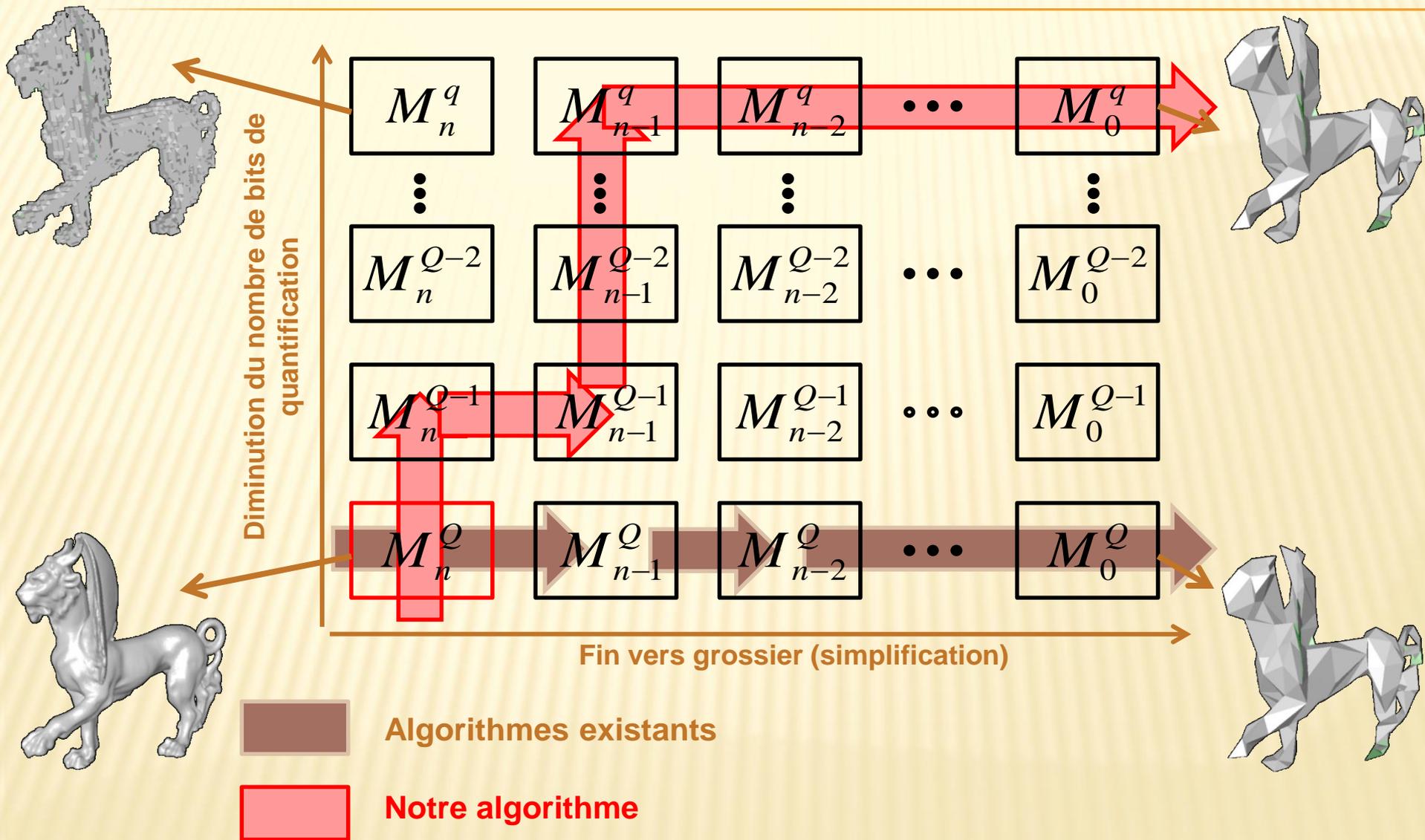


SCHÉMA PRINCIPAL



PROBLÈMES..

✘ Deux problèmes principaux :

- + Détermination de la meilleure opération à chaque itération (encodage)
- + Diminution de la précision de quantification et codage de l'opération inverse

Diminution de la précision
de quantification

$$M_i^{j-1}$$

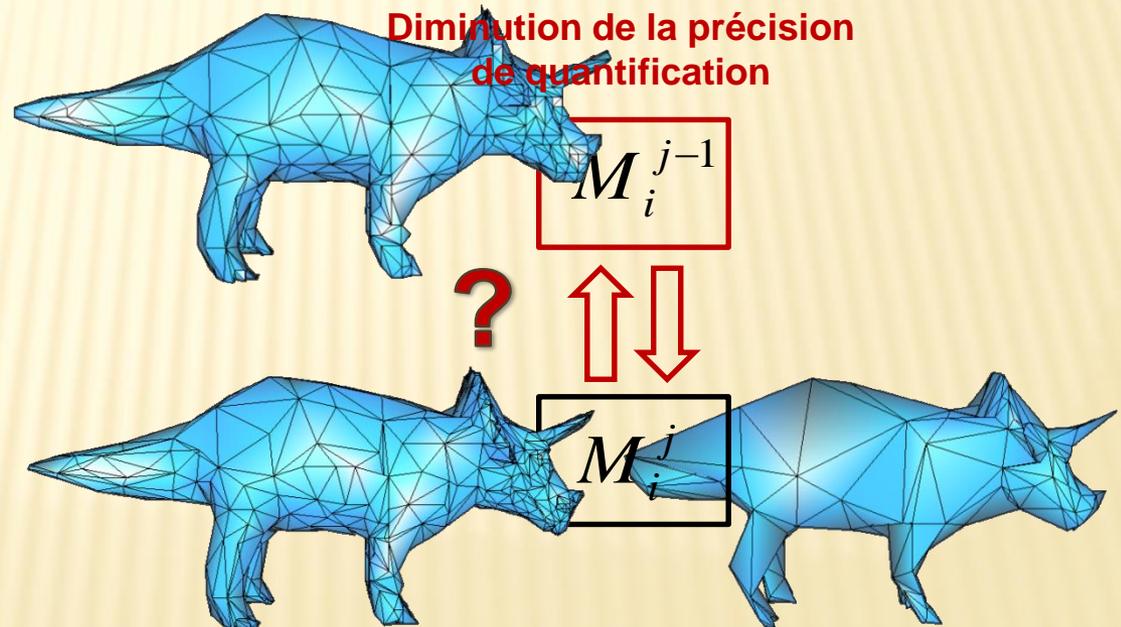


$$M_i^j$$



$$M_{i-1}^j$$

Décimation



DIMINUTION DE PRÉCISION DE QUANTIFICATION

Quantification initiale - Q bits

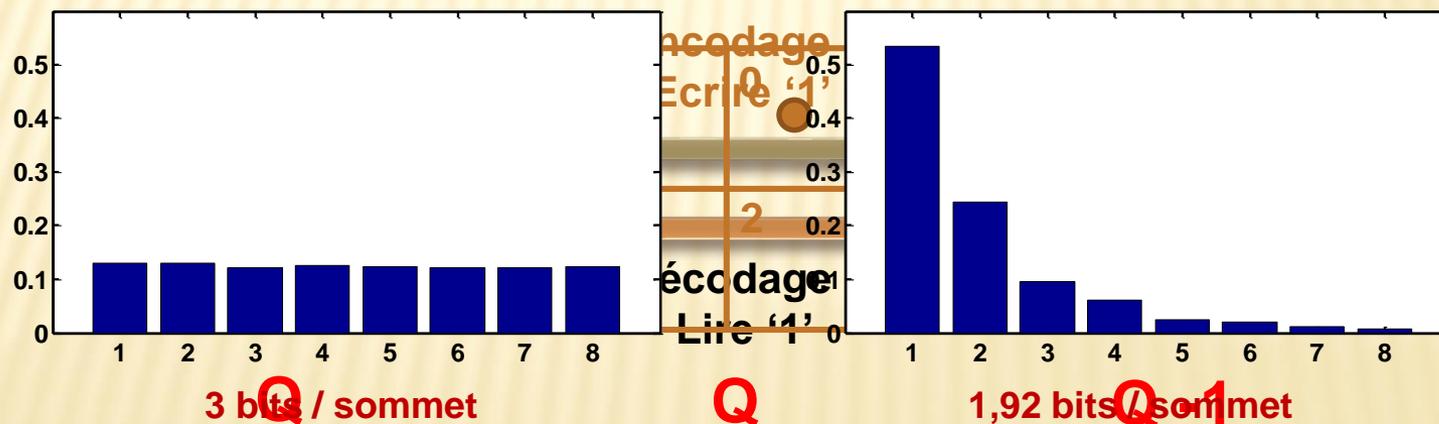
- Division de la boîte englobante en $2^Q \times 2^Q \times 2^Q$ cellules

Diminution de quantification considérée comme une opération de la fusion dans un **octree**

- Codage d'un indice [0 ; 7] pour chaque sommet

Codage efficace

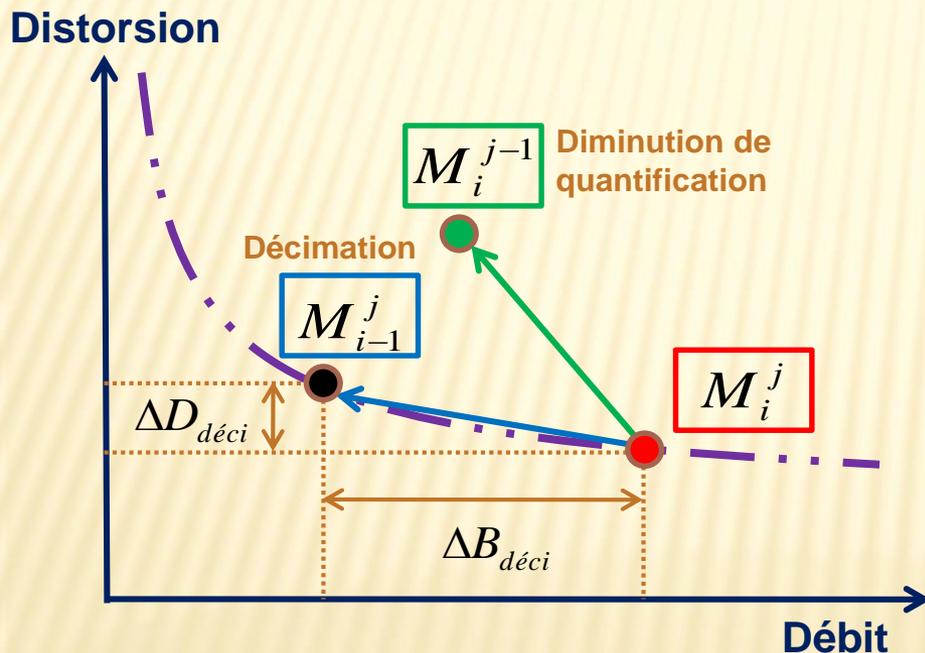
- Utilisation de la prédiction géométrique de *[Peng et Kuo 2005]*



DÉTERMINATION OPTIMALE

✗ Nous mesurons :

- + Erreur géométrique ΔD
- + Nombre de bits nécessaires ΔB



$$\text{Si } \frac{\Delta D_{déci}}{\Delta B_{déci}} \leq \frac{\Delta D_{quan}}{\Delta B_{quan}} \rightarrow \text{décimation}$$

Sinon \rightarrow diminution de quantification

TEMPS DE CALCUL

- ✗ Comparaison du temps de calcul de l'encodage (en secondes)
 - + INTEL CPU dual core à 2,8 GHz avec 4 Go de mémoire

Modèle	# Sommets	AD 2001 (secondes)	Nous (secondes)
Fandisk	6 475	0,1	38,8
Venusbody	11 362	0,2	49,6
Horse	19 851	0,5	131,8
Torus	36 450	0,3	177,2
Rabbit	67 039	1	662,1
Neptune	249 425	4,3	3 737,5

DÉTERMINATION QUASI-OPTIMALE

✗ Objectif

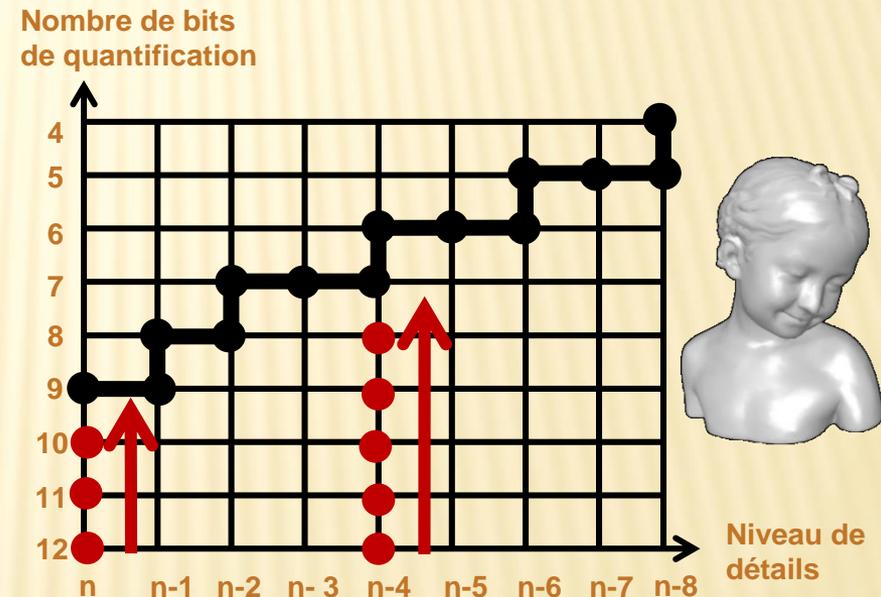
- + Diminuer le temps de calcul dû à la mesure de distorsion

✗ Observation

- + Approche optimale
 - Précision de quantification unique pour chaque LoD

✗ Solution

- + Retrouver ce chemin à l'aide d'une analyse géométrique

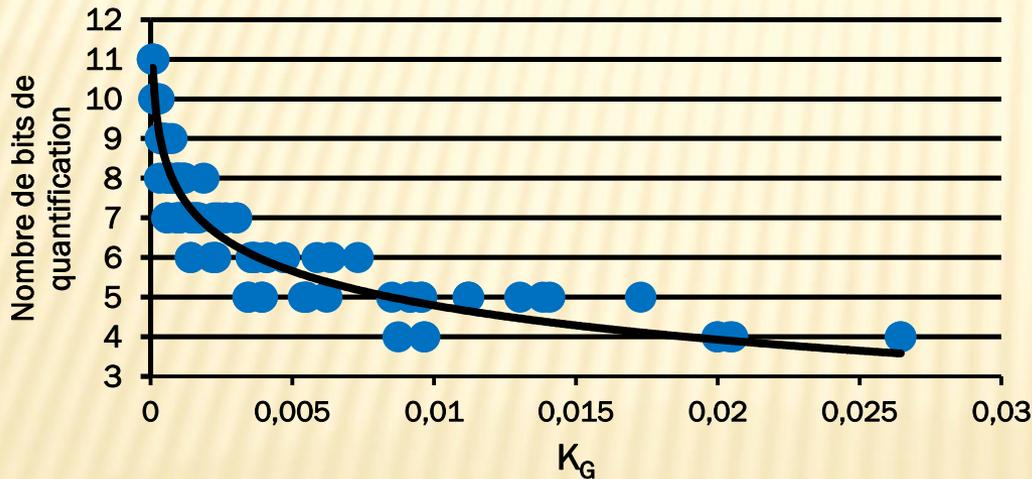


DÉTERMINATION QUASI-OPTIMALE

✗ Mesure de complexité K_G

✗
$$K_G = \frac{\text{volume de boîte englobante}}{\text{aire de surface} \otimes \text{nombre de sommets}}$$

✗ Apprentissage en utilisant des résultats obtenus par la méthode de détermination optimale

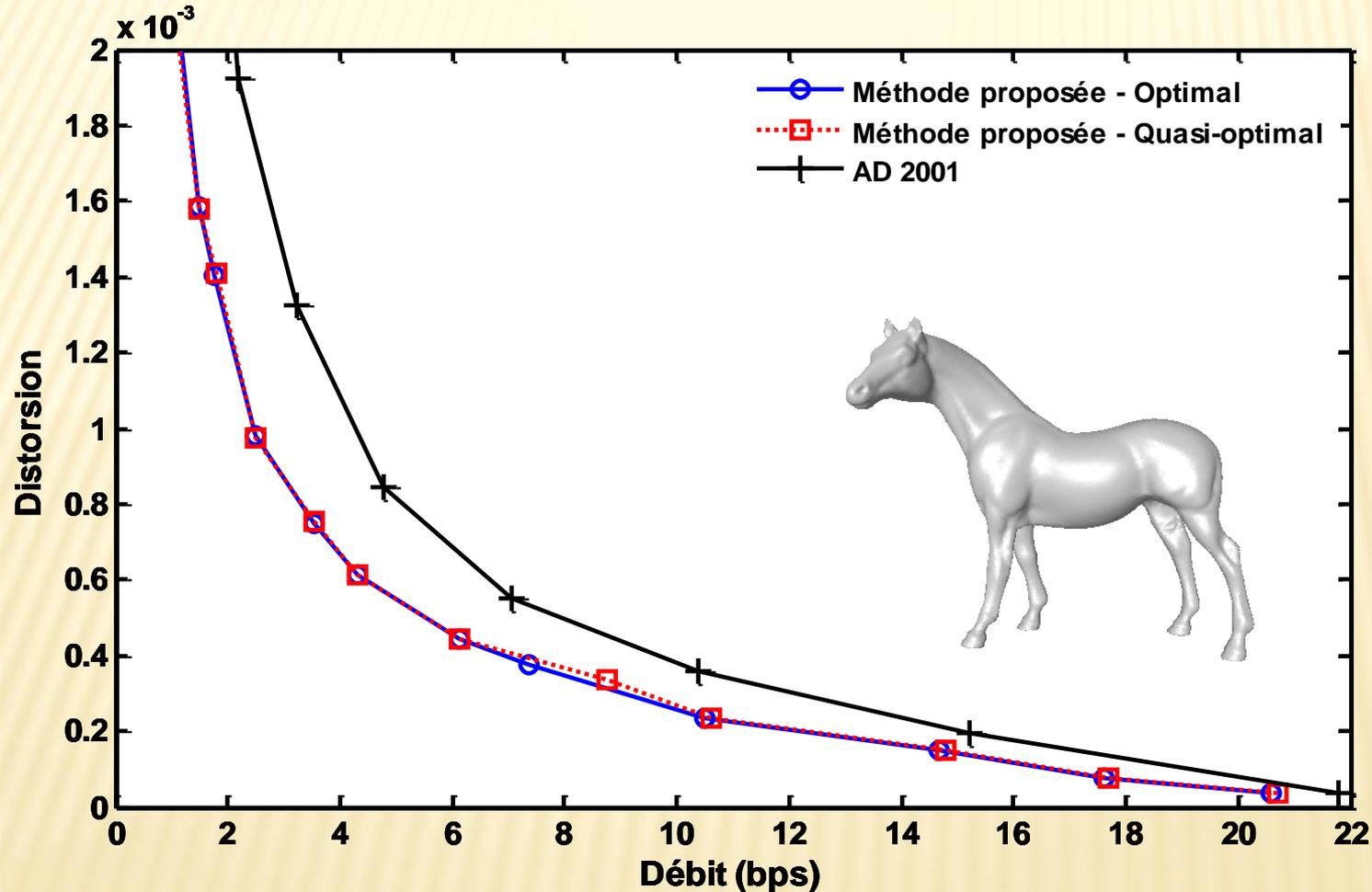


$$q_G = \lfloor -1,248 * \log(K_G) - 0,454 \rfloor$$

A chaque itération,
si **quantification actuelle** $> q_G$
→ diminution de quantification
sinon
→ décimation

DÉBIT-DISTORSION

✘ Horse (#v = 19 851, Q = 12 bits)



Alliez et Desbrun
(AD 2001)

Valette et Prost
(VP 2004)

Peng et Kuo
(PK 2005)

Valette et al.
(VCP 2009)

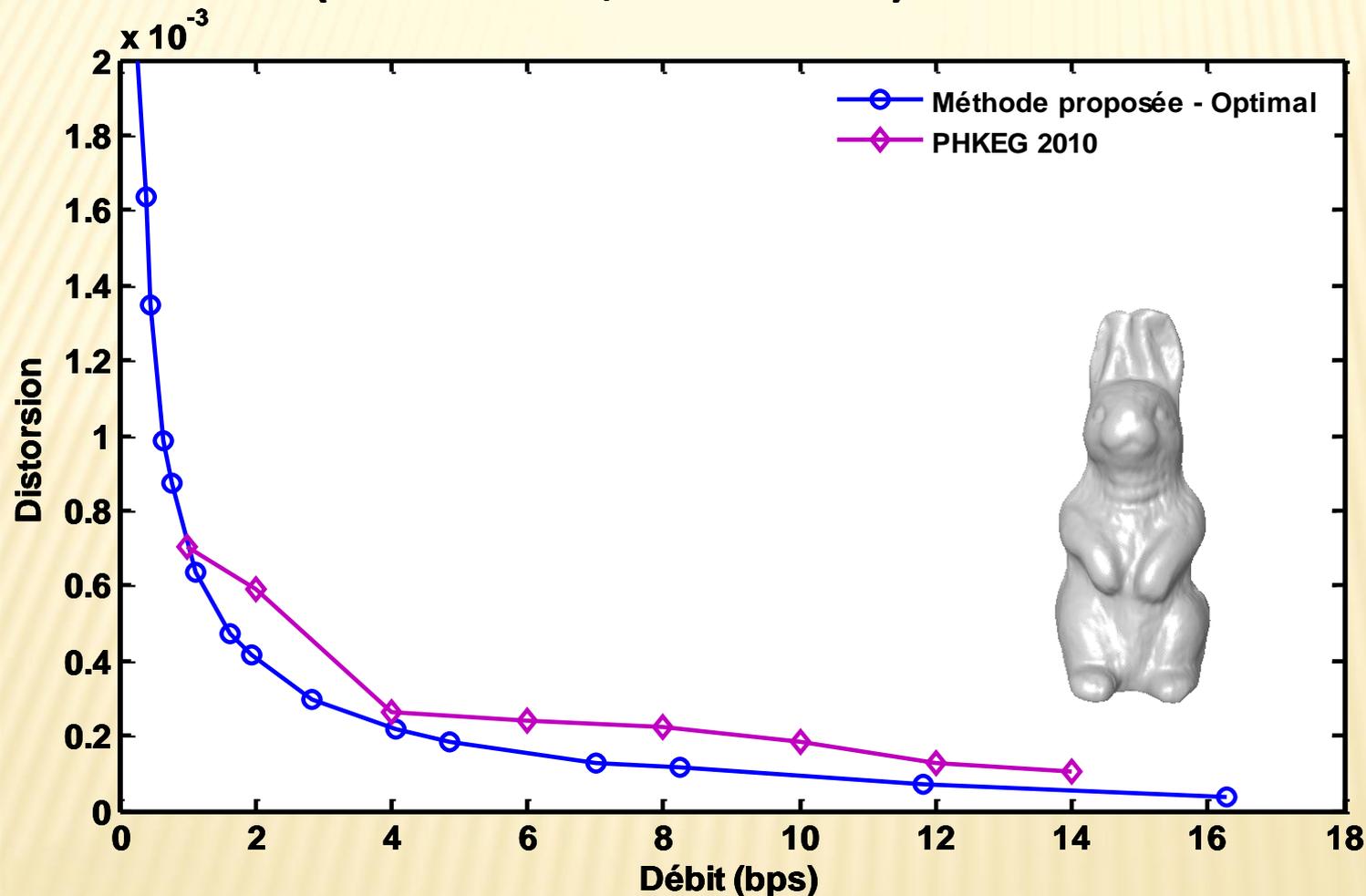
Mamou et al.
(MDCG 2010)

Peng et al.
(PHKEG 2010)

Méthode proposée
Lee Lavoué Dupont
(LLD 2011)

DÉBIT-DISTORSION

✘ Rabbit (#v = 67 039, Q = 12 bits)



Alliez et Desbrun
(AD 2001)

Valette et Prost
(VP 2004)

Peng et Kuo
(PK 2005)

Valette et al.
(VCP 2009)

Mamou et al.
(MDCG 2010)

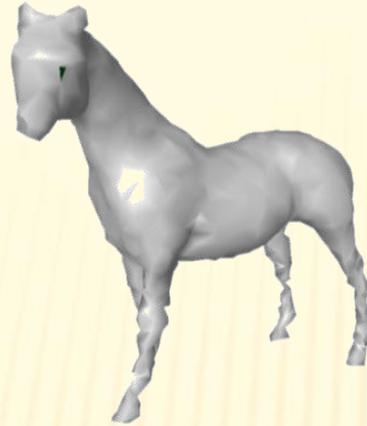
Peng et al.
(PHKEG 2010)

Méthode proposée
Lee Lavoué Dupont
(LLD 2011)

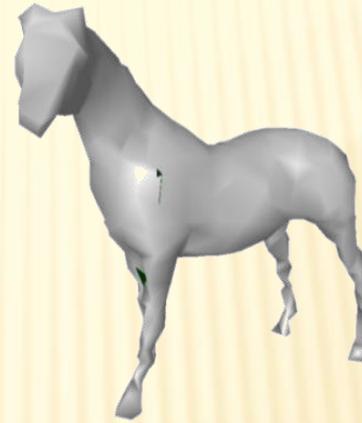
COMPARAISON VISUELLE

✗ Pour des taux similaires

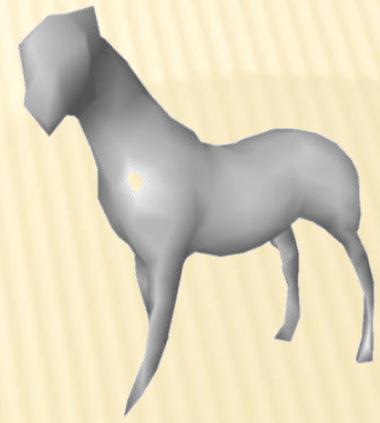
≈ 1 bit / sommet



LLD (optimal)
1,08 bps



AD 2001
1,04 bps

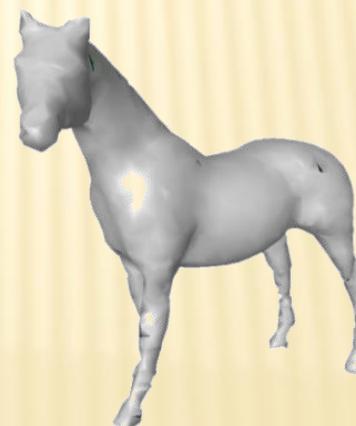


VCP 2009
1 bps

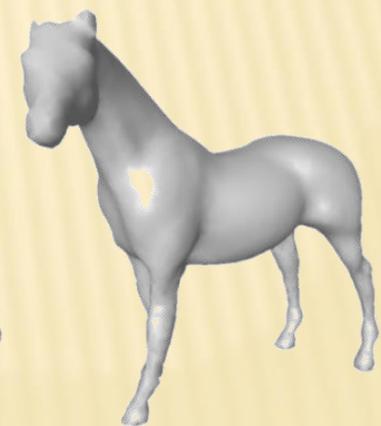
≈ 4 bits / sommet



LLD (optimal)
3,55 bps



AD 2001
3,23 bps



VCP 2009
4 bps

TEMPS DE CALCUL DE L'ENCODAGE

- ✗ Comparaison du temps de calcul de l'encodage (en secondes)
 - + INTEL CPU dual core à 2,8 GHz avec 4 Go de mémoire

Modèle	# Sommets	AD 2001	LLD (Optimal)	LLD (Quasi-optimal)
Fandisk	6 475	0,1	38,8	0,2
Venusbody	11 362	0,2	49,6	0,4
Horse	19 851	0,5	131,8	0,8
Torus	36 450	0,3	177,2	0,7
Rabbit	67 039	1	662,1	2,4
Neptune	249 425	4,3	3 737,5	7,5

TEMPS DE CALCUL DU DÉCODAGE

- ✗ Comparaison du temps de calcul du décodage (en secondes)
 - + INTEL CPU dual core à 2,8 GHz avec 4 Go de mémoire

Modèle	# Sommets	AD 2001	LLD (Optimal)	LLD (Quasi-optimal)
Fandisk	6 475	0,1	0,1	0,1
Venusbody	11 362	0,1	0,3	0,3
Horse	19 851	0,2	0,7	0,6
Torus	36 450	0,3	0,7	0,7
Rabbit	67 039	0,8	2,0	1,9
Neptune	249 425	3,4	5,2	5,3

COMPRESSION PROGRESSIVE GUIDÉE PAR LA COULEUR

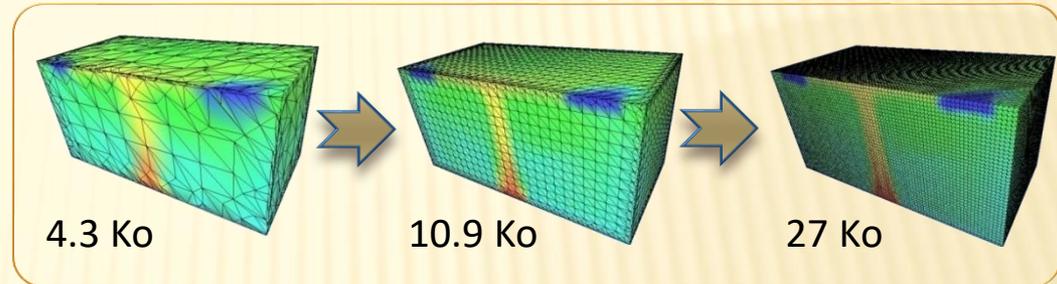
COMPRESSION : LIRIS (PROJET ANR COLLAVIZ)

<http://www.collaviz.org/>

✘ Compression progressive guidée par la couleur

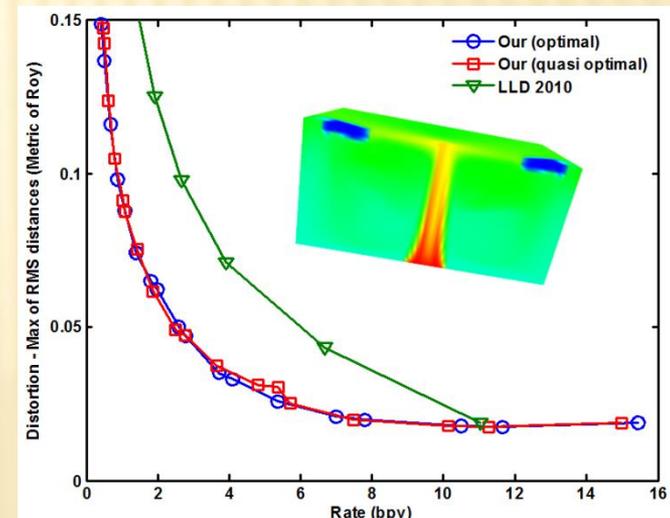


Codage

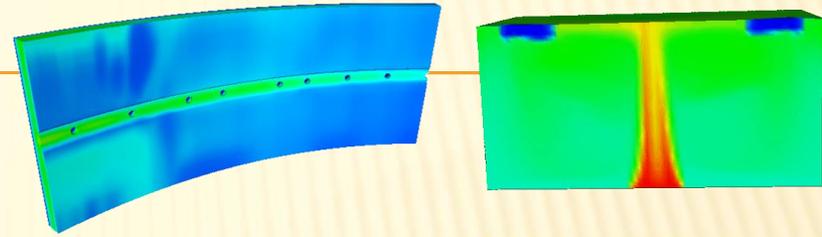


Décodage par niveaux de détails

- Optimisation de la qualité visuelle des niveaux de détails
 - Détermination de la quantification optimale pour la géométrie et la couleur
 - Introduction d'une métrique couleur pour préserver les caractéristiques importantes
- Intégration d'un schéma de protection des données (tatouage)



ETAT DE L'ART



× Simplification

- + Erreur quadratique [Garland et Heckbert 1998] [Hoppe 1999]
- + Raffinement de faces [Rigiroli et al. 2001]
- + Déviation de texture [Cohen et al. 1998]
- + Images [Lindstrom et Truk 2000]

× Compression

- + Prédiction [Yoon et al. 2006]
- + Table de couleur [Ahn et al. 2006]
- + Basée sur la compression progressive [Cirio et al. 2010]



[Cirio et al. 2010]
3 bits/sommet

CODAGE DE LA COULEUR

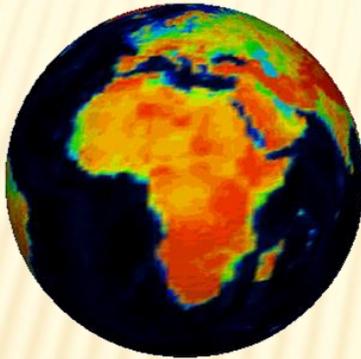
× Prédiction

- + Conversion dans l'espace $L^*a^*b^*$
- + Utilisation des couleurs des sommets voisins pour la prédiction
- + Considération de la discontinuité
 - × Sélection d'une couleur parmi les couleurs des sommets voisins

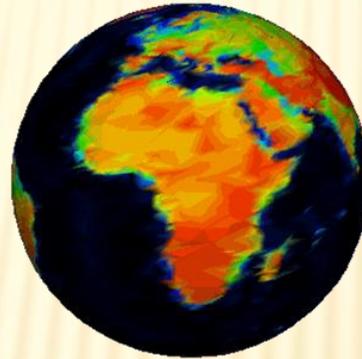


MÉTRIQUE

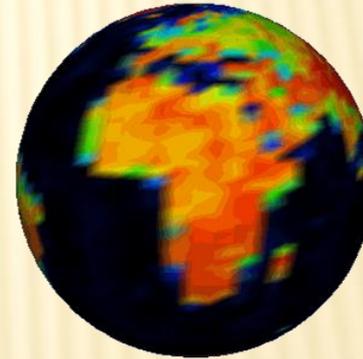
- ✗ **Compression progressive dirigée par la couleur**
 - + Préservation des éléments caractéristiques
 - + Métrique pour mesurer l'importance de chaque sommet



(a)
Original
36 866 sommets



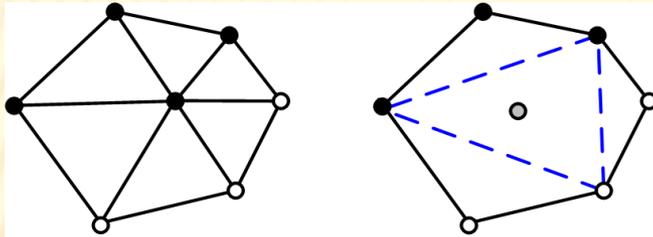
(b)
Simplifié
avec métrique
5 010 sommets



(c)
Simplifié
sans métrique
4 889 sommets

MÉTRIQUE

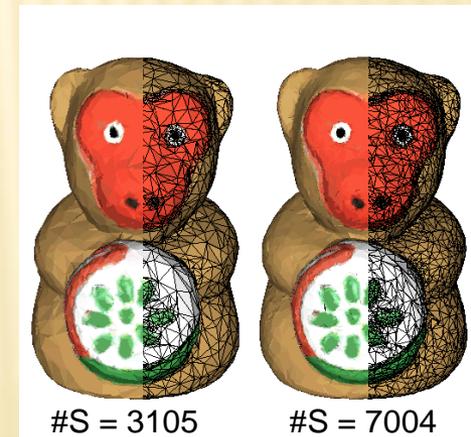
- ✗ Mesure du coût de l'enlèvement d'un sommet
- ✗ Coût = $\alpha \times \text{Ecouleur}$
 - + Erreur de couleur



- + Pondération α
 - ✗ Adapter la complexité pour chaque LoD

$$\alpha = \frac{\text{Aire moyenne des faces du patch}}{\text{Aire moyenne des faces du maillage}}$$

- + Normalisation de Ecouleur
 - ✗ Enlèvement du sommet si coût < 0,5



OPTIMISATION DU COMPROMIS DÉBIT-DISTORSION

- ✘ **Adaptation de la précision de quantification de la couleur et de la géométrie**
- ✘ **Détermination de la meilleure opération (encodage)**
 - + **Décimation**
 - + **Réduction de la quantification de la géométrie**
 - + **Réduction de la quantification de la couleur**
- ✘ **Codage efficace de l'opération inverse de la réduction de la quantification**

DÉTERMINATION DE LA PROCHAINE OPÉRATION

× Détermination optimale

- + Calcul de ΔD et de ΔB pour les trois possibilités
- + Erreur géométrique ΔD est mesurée en utilisant [Roy et al. 2006]

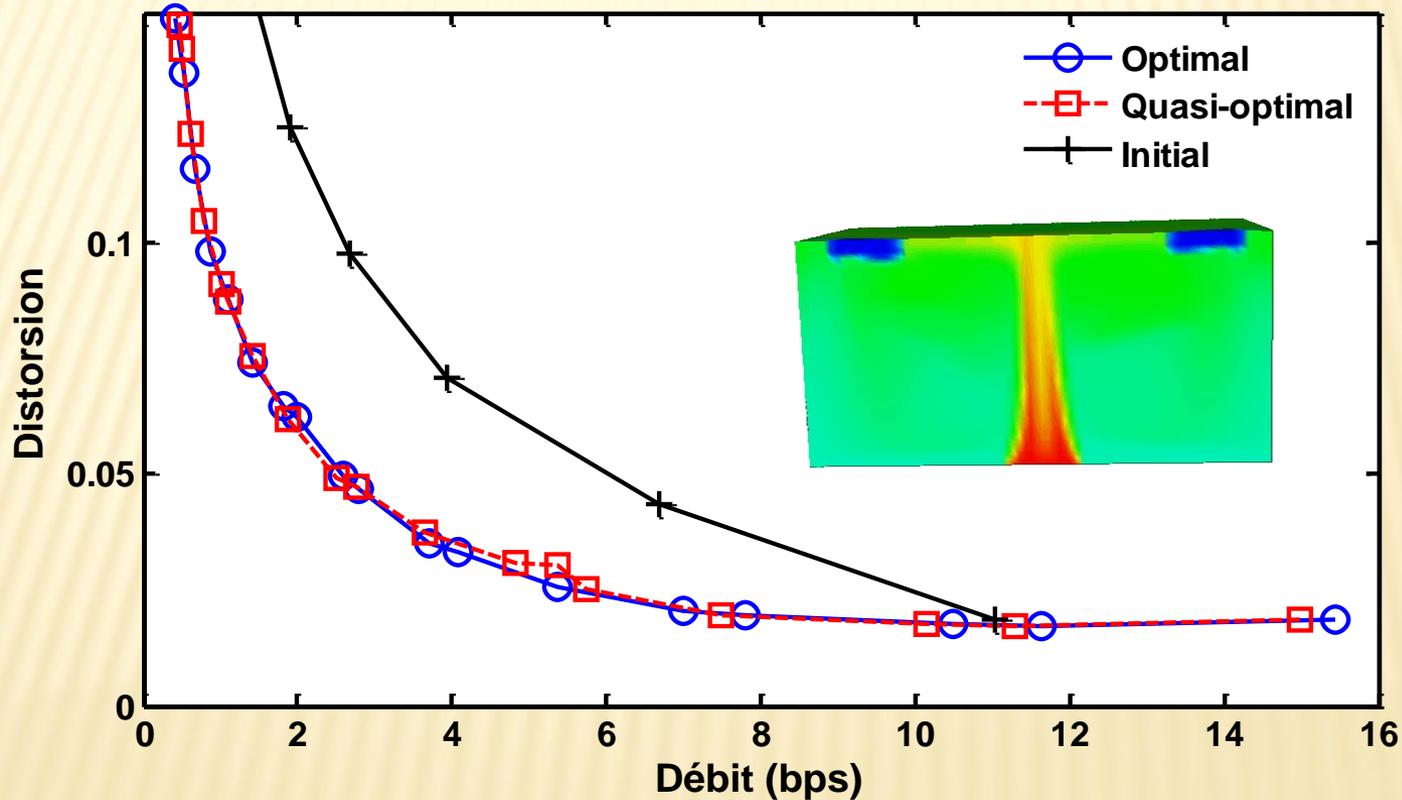
× Détermination quasi-optimale

- + Retrouver le chemin parcouru par la méthode optimale
- + A chaque itération, estimer qG (q. géométrie) et qC (q. couleur)
→ propriétés colorimétriques et géométriques
- + Basée sur le même processus d'apprentissage que précédemment

DÉBIT-DISTORSION

✗ Radiateur (#v = 16 002, Q = 12 bits)

- + Comparaison avec notre méthode (Initial) sans utilisation de :
 - ✗ Adaptation de quantification
 - ✗ Métrique

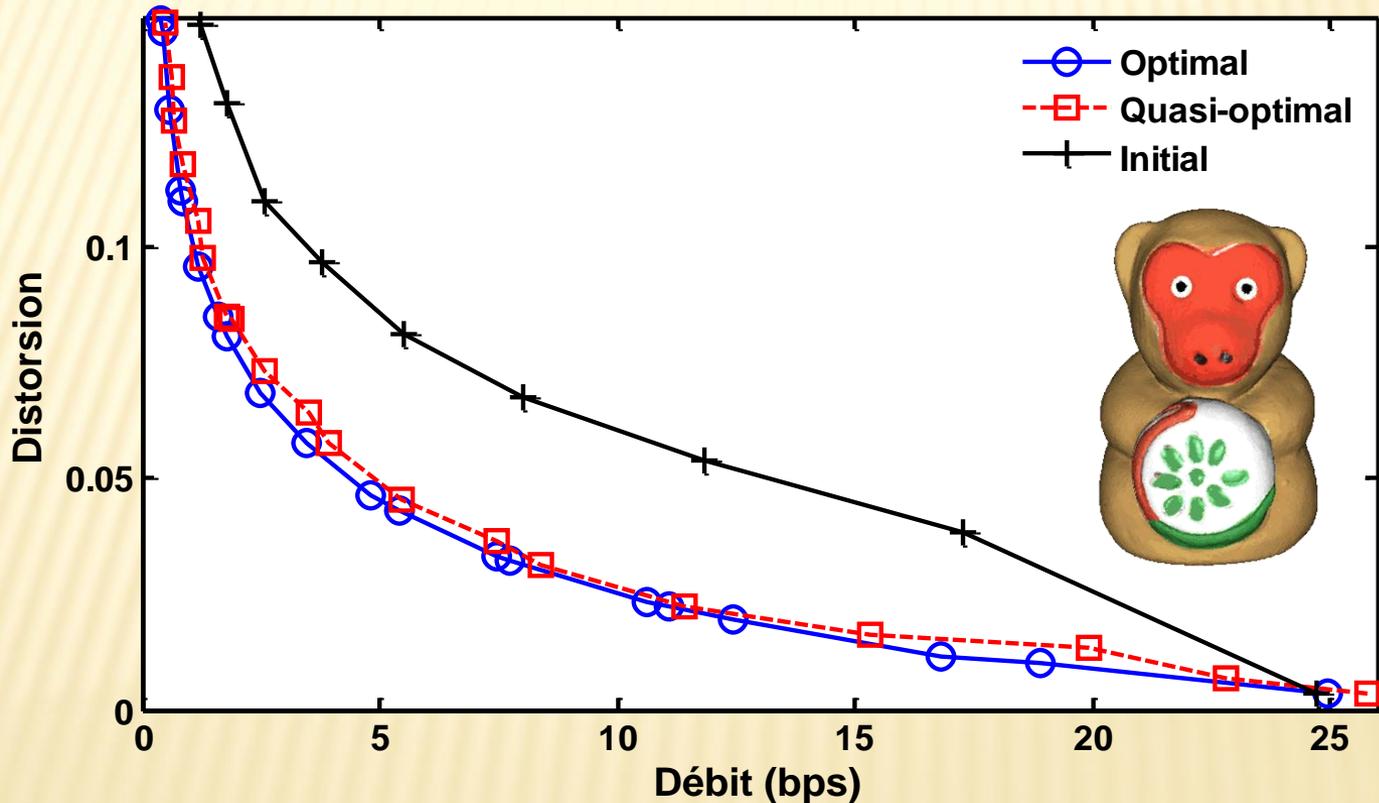


DÉBIT-DISTORSION

× GIST-Monkey (#v = 50 503, Q = 12 bits)

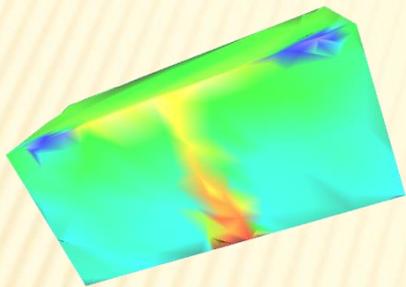
+ Comparaison avec notre méthode (Initial) sans utilisation de :

- × Adaptation de quantification
- × Métrique

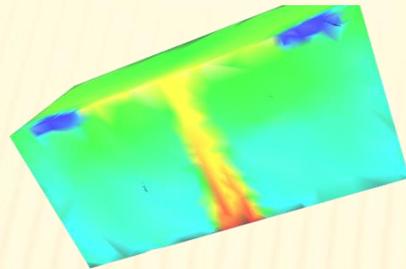


RÉSULTATS

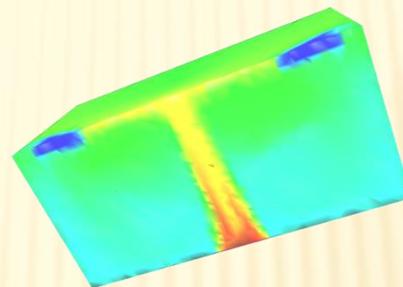
✗ Modèles intermédiaires pour des taux similaires



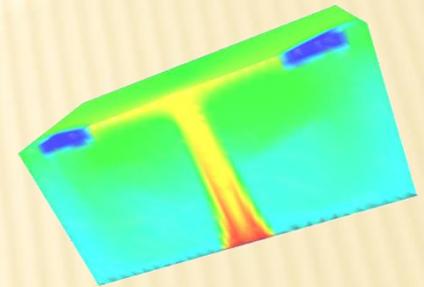
(a) Optimal
0,96 bps



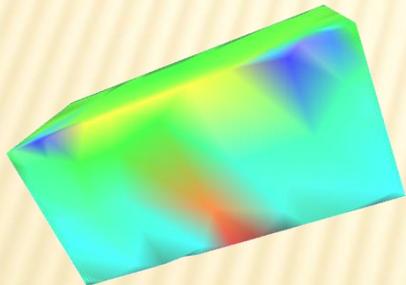
(b) Optimal
2,05 bps



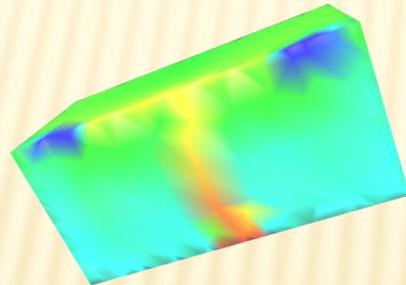
(c) Optimal
4,18 bps



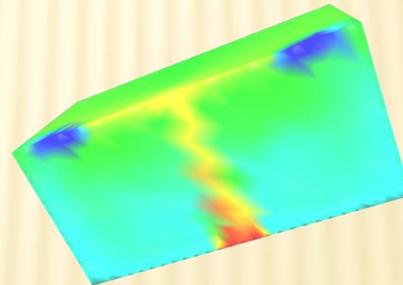
(d) Optimal
8,45 bps



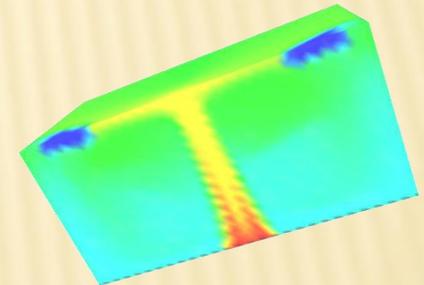
(e) Initial
1 bps



(f) Initial
2,19 bps



(g) Initial
3,82 bps



(h) Initial
8,03 bps

TEMPS DE CALCUL DE L'ENCODAGE

✗ Comparaison du temps de calcul de l'encodage (en secondes)

+ INTEL CPU dual core à 2,8 GHz avec 4 Go de mémoire

Modèle	# Sommets	Méthode initiale	LLD (Optimal)	LLD (Quasi-optimal)
Swirl	9 216	0,2	22,1	0,4
Nefertiti	10 013	0,3	35,6	1,2
Radiator	16 002	0,4	49,7	0,5
Globe	36 866	1,1	175,8	2,6
Gist-Monkey	50 503	1,5	192,4	2,6
Enveloppe	125 587	3,9	758,9	5,0
Renfort	190 540	6,1	1495,9	6,8

TEMPS DE CALCUL DU DÉCODAGE

- ✗ **Comparaison du temps de calcul du décodage (en secondes)**
 - + INTEL CPU dual core à 2,8 GHz avec 4 Go de mémoire

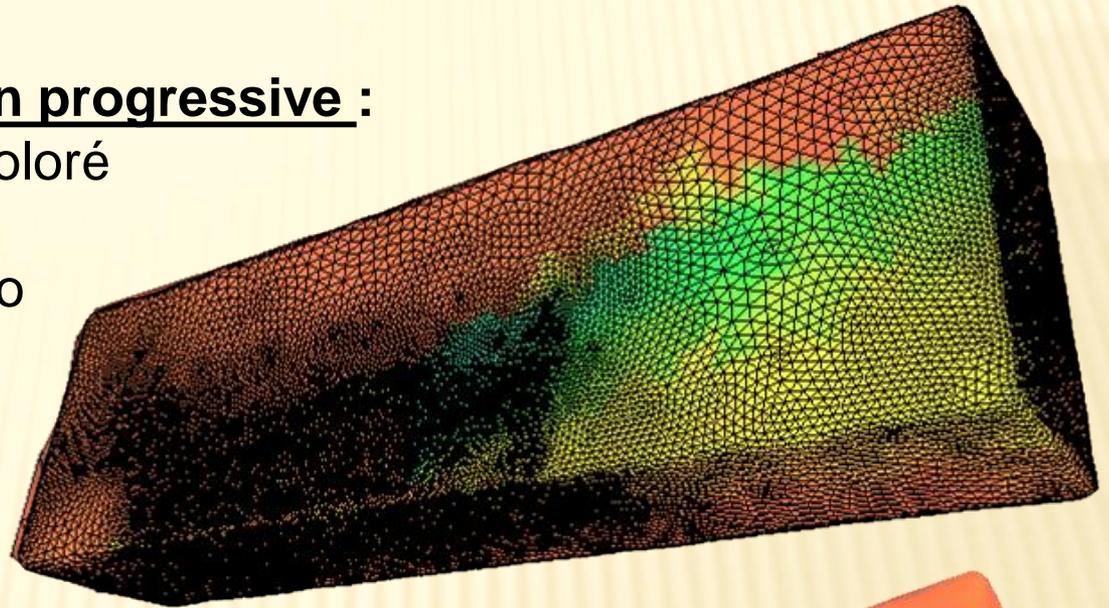
Modèle	# Sommets	Méthode initiale	LLD (Optimal)	LLD (Quasi-optimal)
Swirl	9 216	0,3	0,5	0,5
Nefertiti	10 013	0,3	1,0	1,0
Radiator	16 002	0,3	0,4	0,4
Globe	36 866	0,6	3,2	3,1
Gist-Monkey	50 503	1,5	3,2	3,2
Enveloppe	125 587	3,0	5,0	4,9
Renfort	190 540	5,4	5,9	5,9

LEE ET AL. 2011 - CODAGE

Exemple de décompression progressive :

Données © EDF : maillage coloré

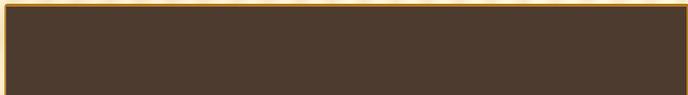
- Fichier original = 2743 Ko
- Fichier compressé = 66 Ko
contient tous les niveaux
de détail



Niveau 0 = maillage de base

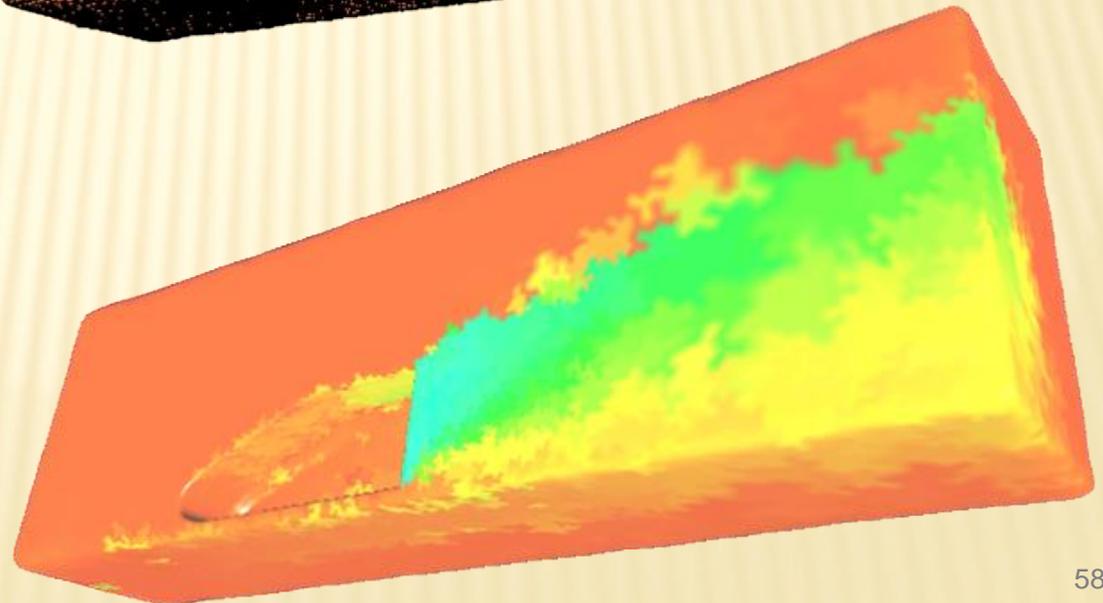
100% = 2743 Ko

100% = 2743 Ko



0

66 Ko



COMPRESSION PROGRESSIVE GUIDÉE PAR LA GÉOMÉTRIE

COMPRESSION MULTI-RESOLUTION

- ✗ Par décomposition sur un octree [Gandoin, 2002]

Précision 8 bits/coordonnée

2890 sommets

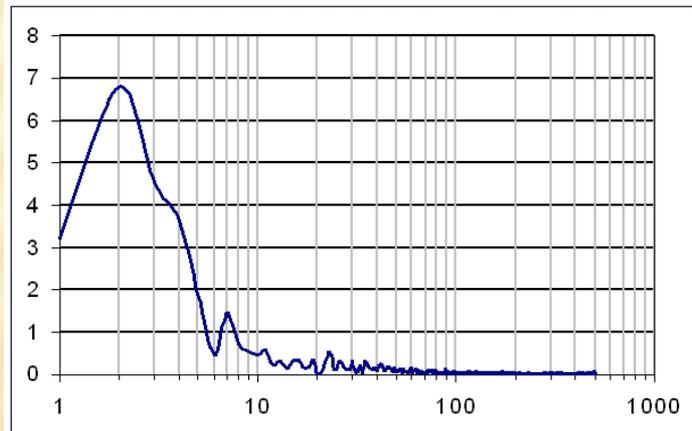
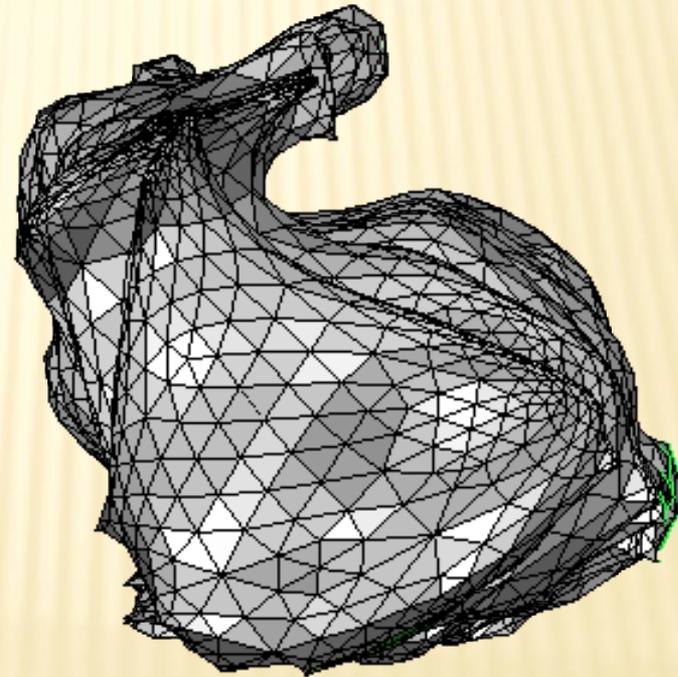
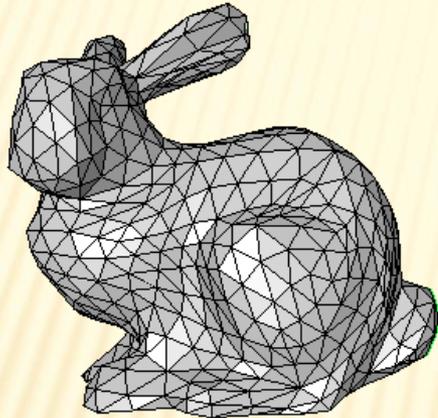


10% du fichier d'origine

COMPRESSION MULTI-RESOLUTION

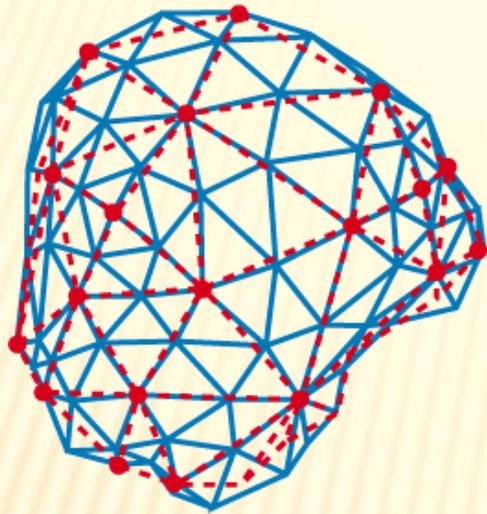
✗ Par décomposition spectrale

On transmet d'abord les coefficients basses fréquences puis les hautes fréquences au fur et à mesure [Karni, Gotsman, 2000]



COMPRESSION MULTI-RESOLUTION

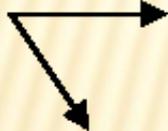
- ✗ Par décomposition sur une base d'ondelettes



Décomposition
multi-échelles



M^6



D^5



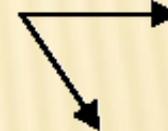
M^5



D^4



M^1

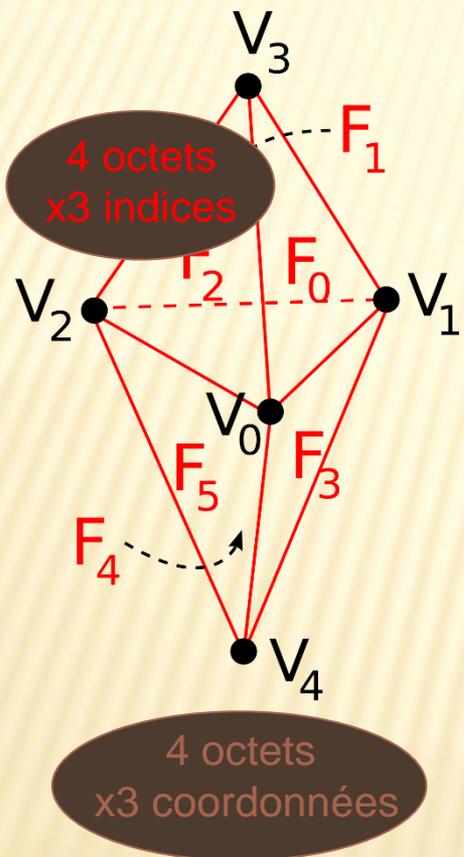
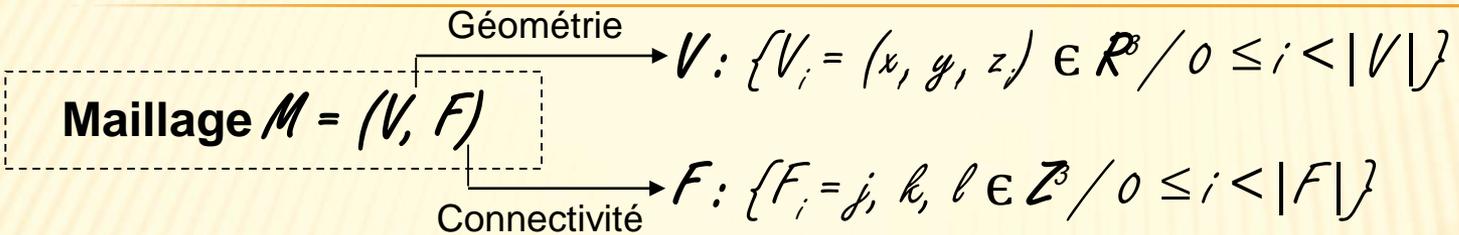


D^0



M^0

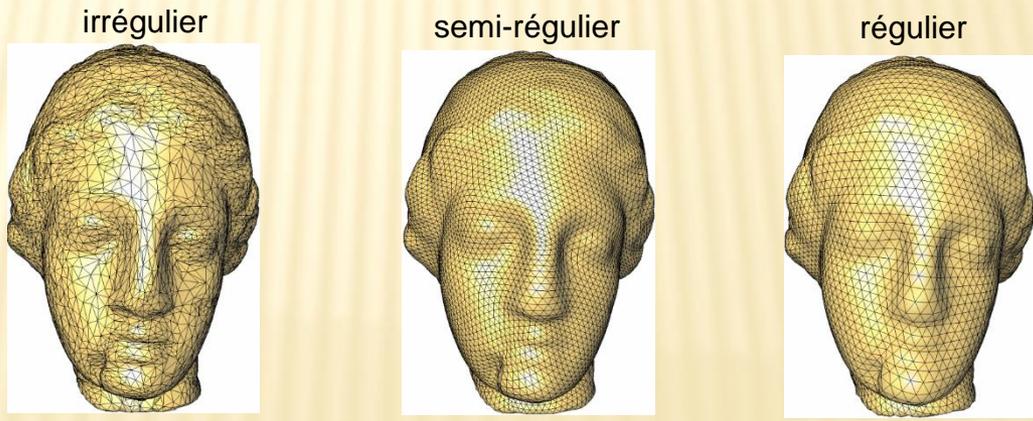
MAILLAGES TRIANGULAIRES



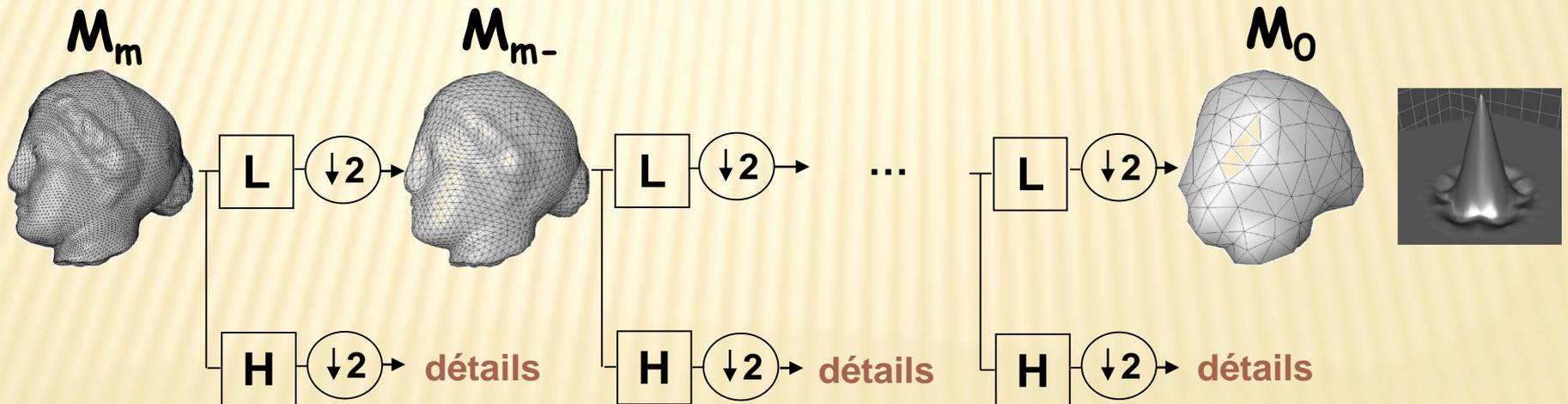
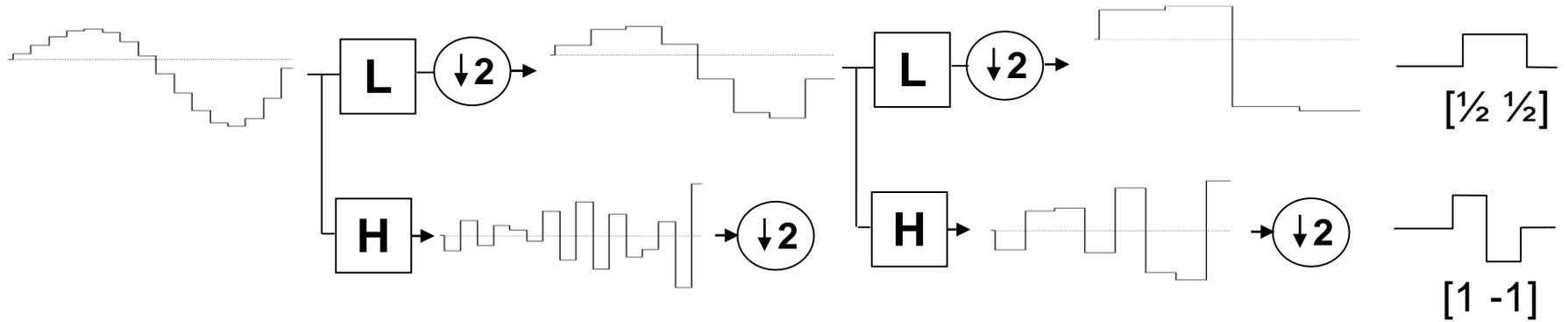
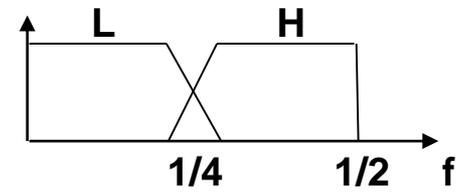
Maillage triangulaire
36 octets / sommet
288 bits / sommet

→ Régis types de maillages :

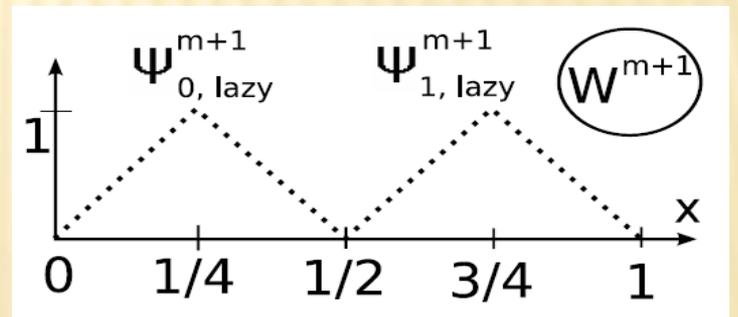
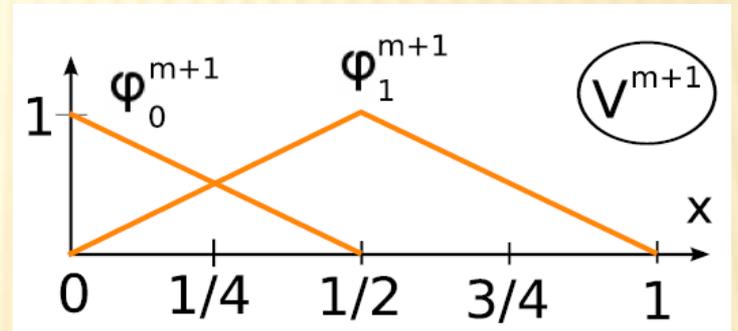
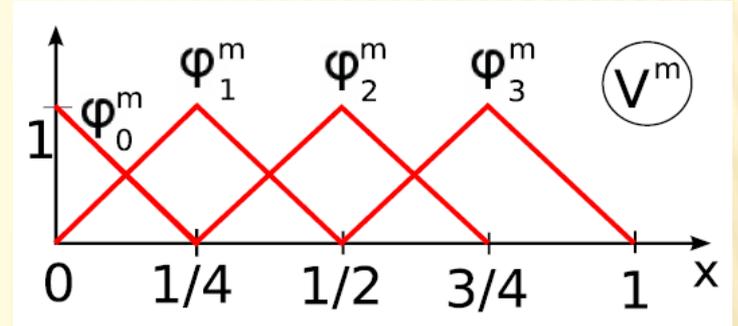
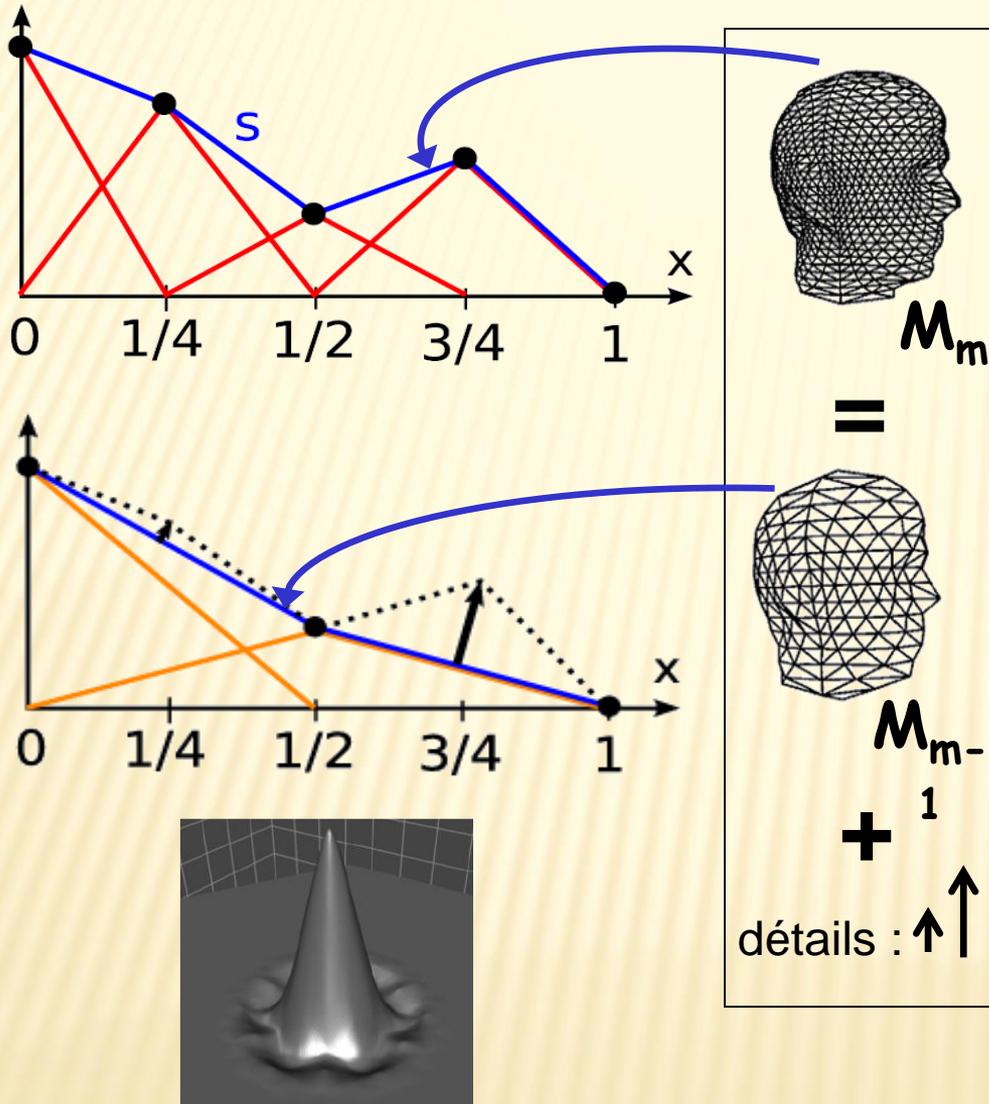
1. irréguliers
2. semi-réguliers : $\exists W \subset V \mid \forall V_i, V_j \in W: \sigma(V_i) \neq \sigma(V_j)$
3. réguliers : $\forall V_i, V_j \in V: \sigma(V_i) = \sigma(V_j)$



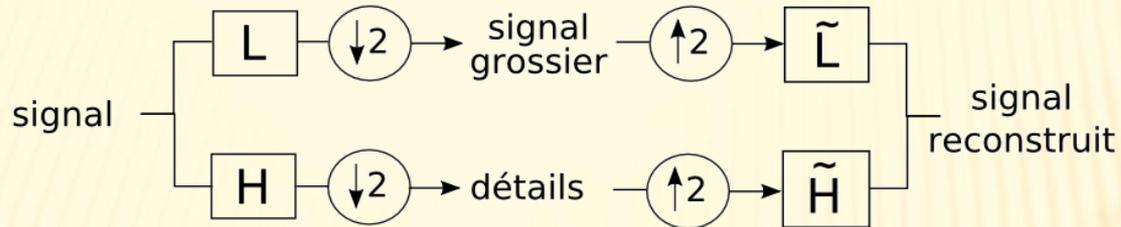
L'ANALYSE MULTIRÉSOLUTION



THÉORIE DES ONDELETTES



ONDELETES GÉOMÉTRIQUES

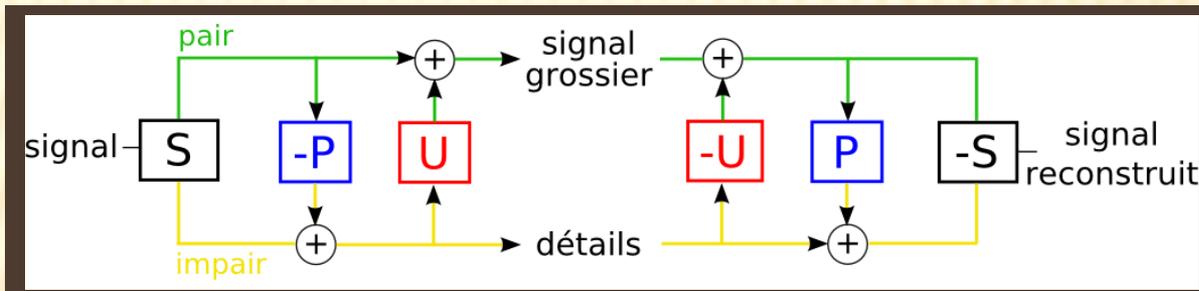


[Mallat, 89]

≡ Généralisation des bancs de filtres

● Analyse multirésolution spatiale

S : Split
P : Predict
U : Update



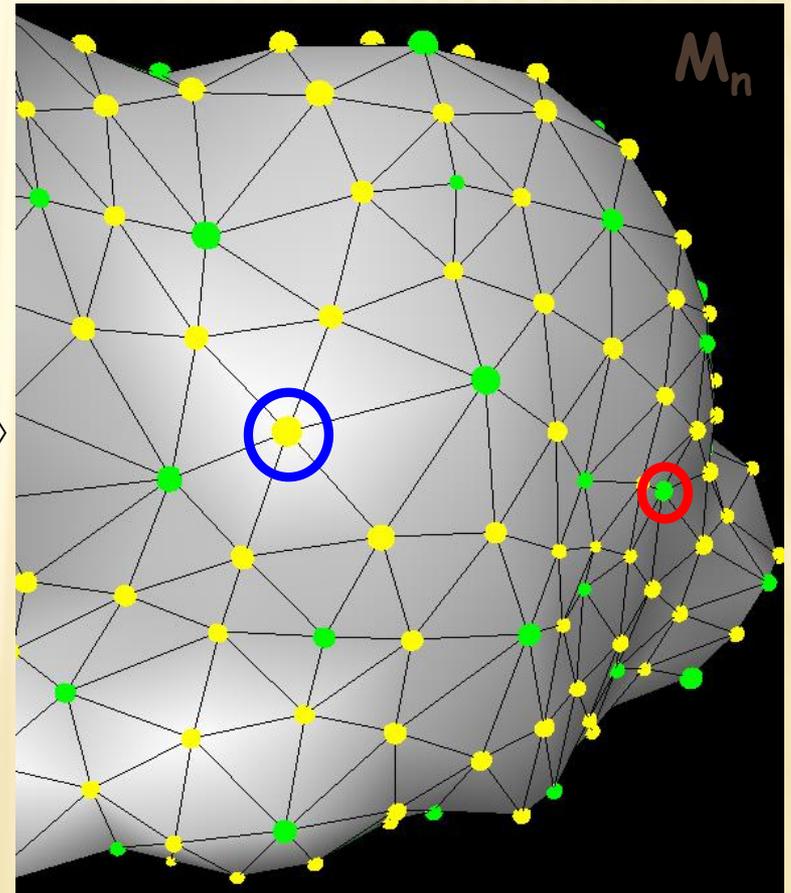
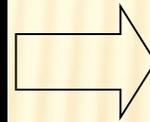
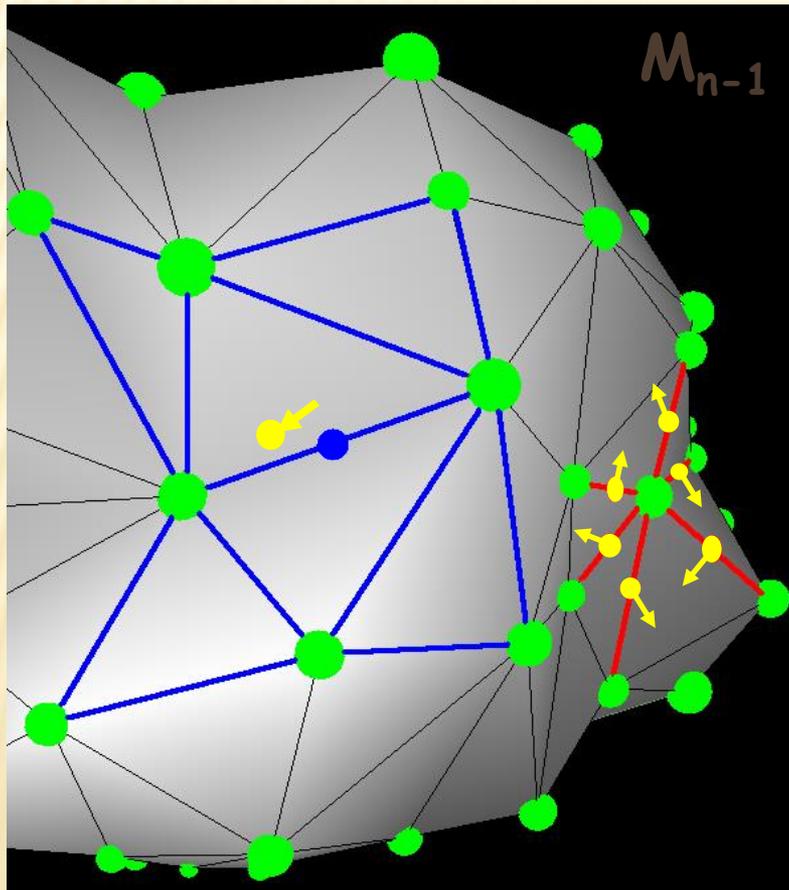
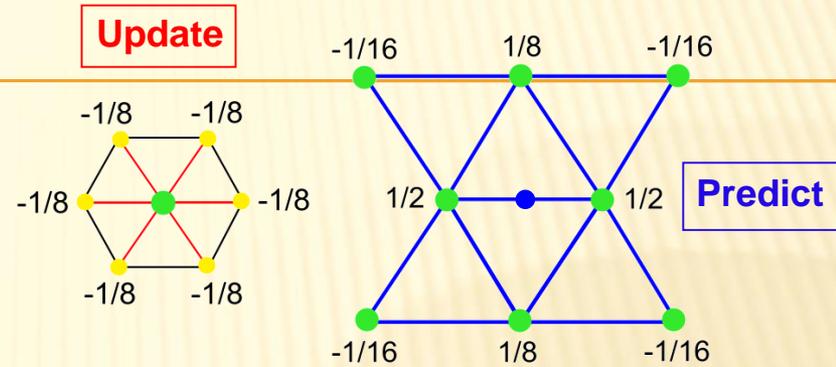
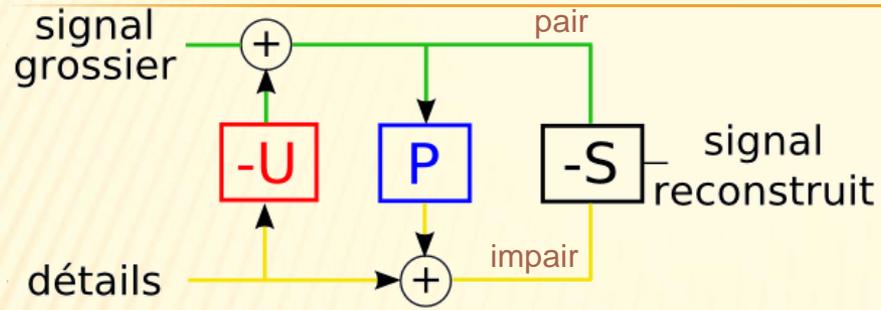
[Sweldens, 95]

[Lounsbery, 97]

≡ Avantages :

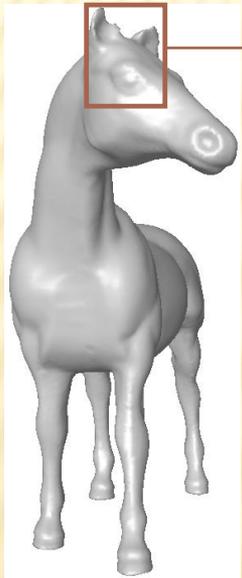
- Coûts de calcul réduits
- Filtrés simplifiés
- Analyse et synthèse en temps linéaire

EN PRATIQUE

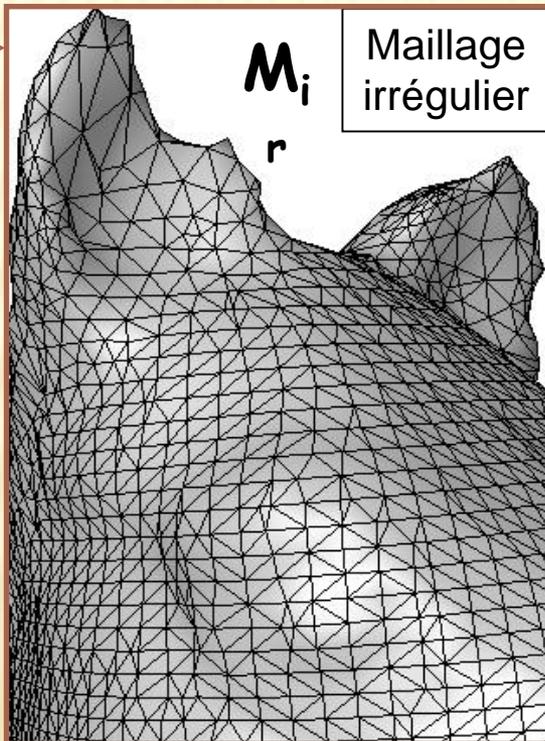


REMAILLAGE SEMI-RÉGULIER

- Propice à l'application d'une transformée en ondelettes
- Grande partie de la connectivité : implicite
- Réduction de l'erreur de reconstruction d'un facteur 4

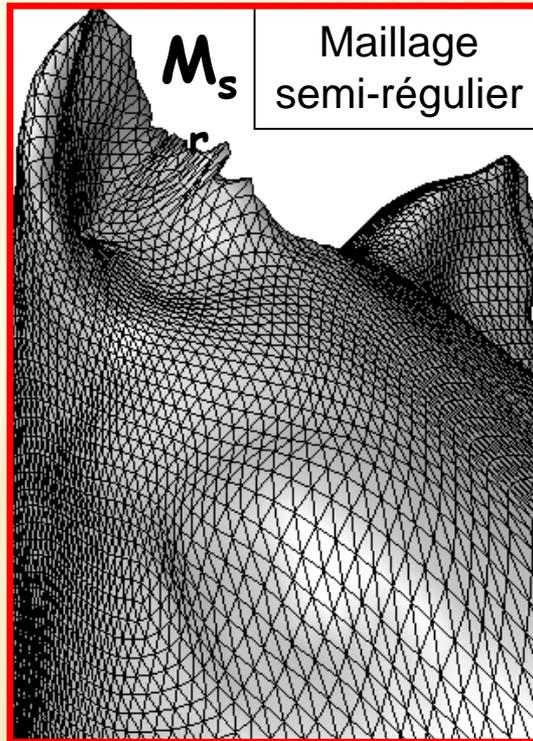


M_n
original



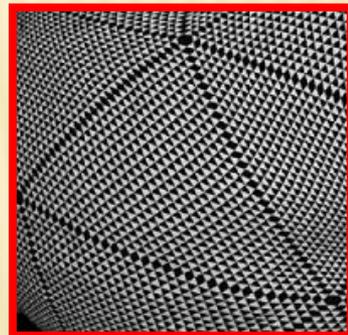
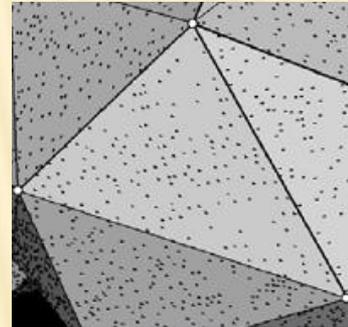
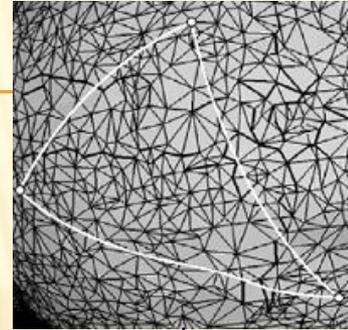
M_i
Maillage irrégulier

48 485 sommets

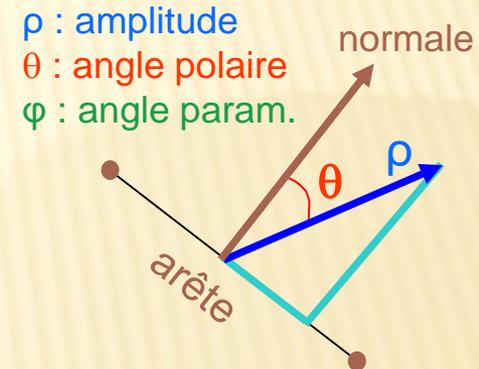
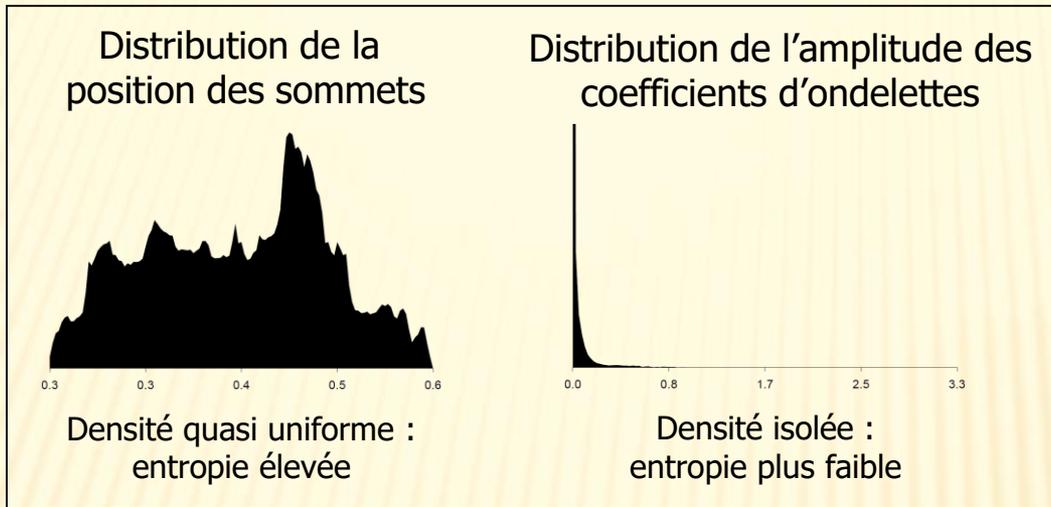


M_s
Maillage semi-régulier

112 642 sommets



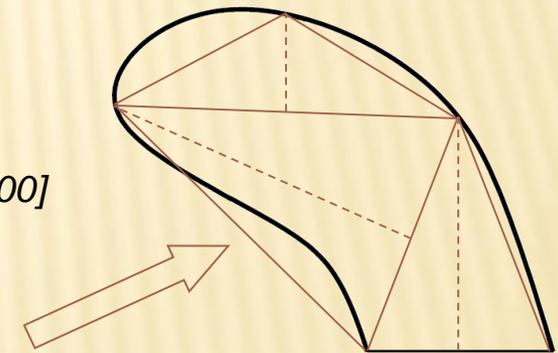
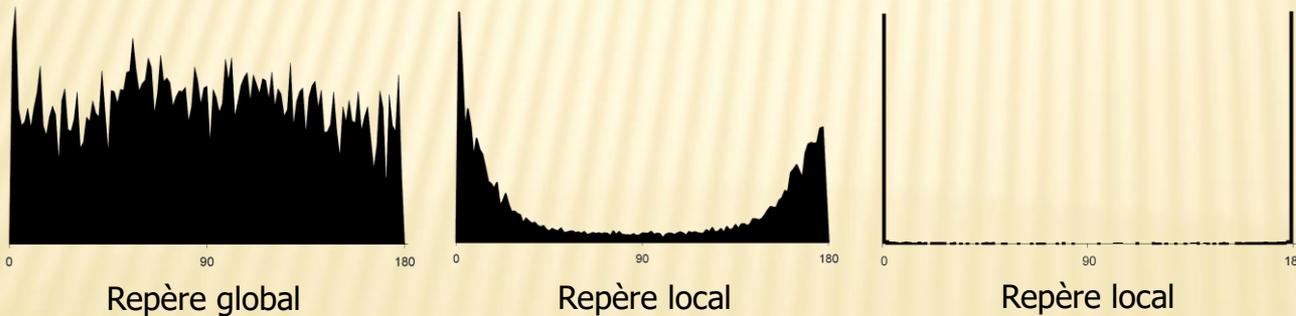
INTÉRÊT DES ONDELETTES ET DU REMAILLAGE



Distribution de l'angle polaire des coefficients d'ondelettes

MAPS [Lee et al., 98]

Normal Mesh [Guskov et al., 00]



ANALYSE ONDELETES GLOBALE



Niveau n-2

Remaillage Normal

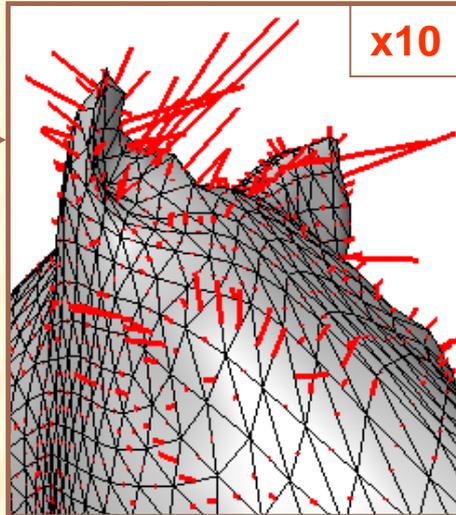
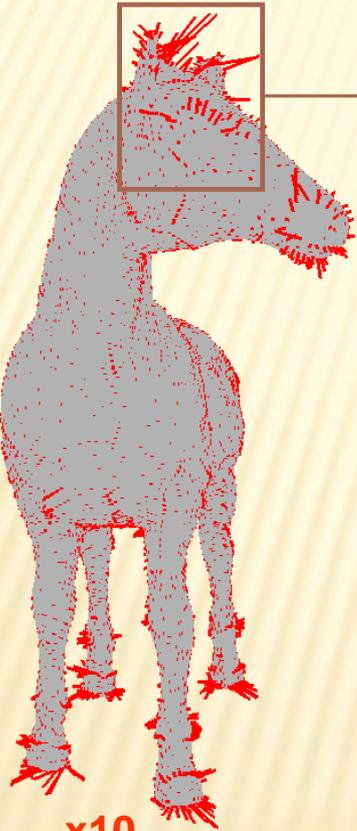
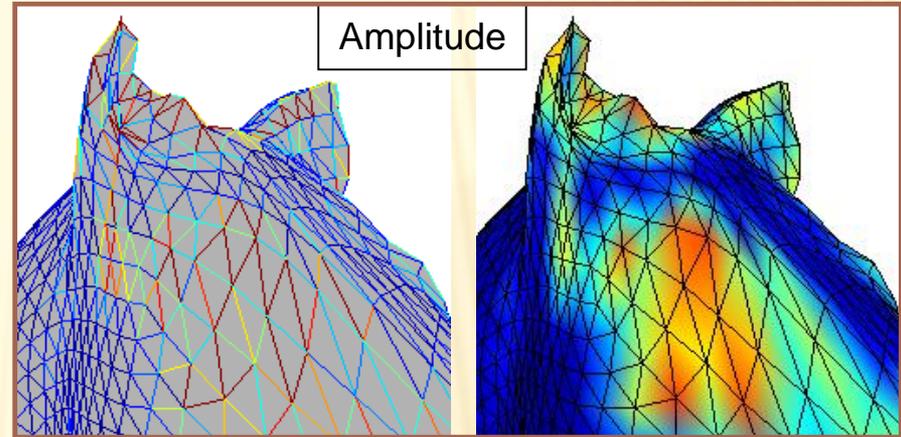
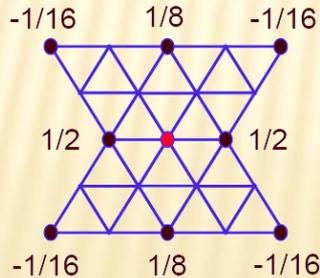
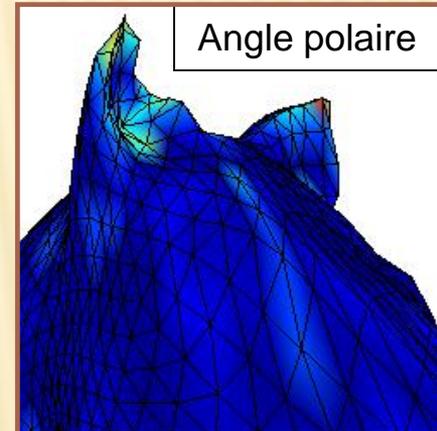
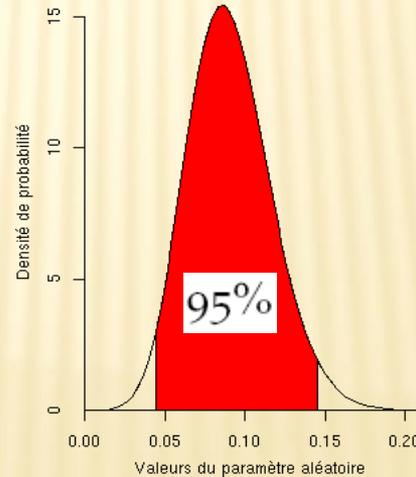


Schéma Butterfly non lifté



Amplitude

$[\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$



Angle polaire

AMPLITUDE DES ONDELETTES

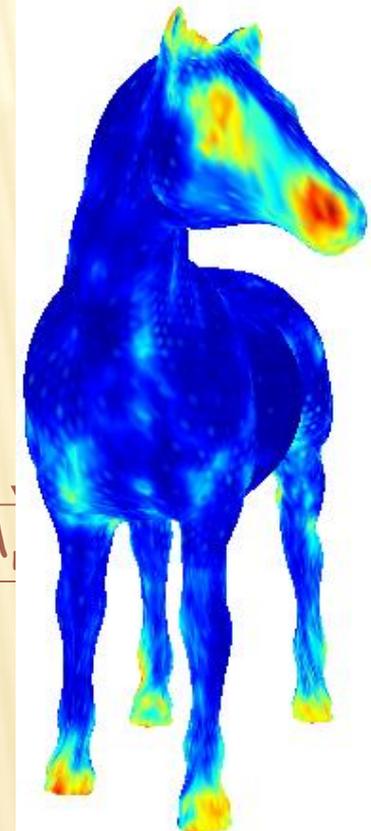
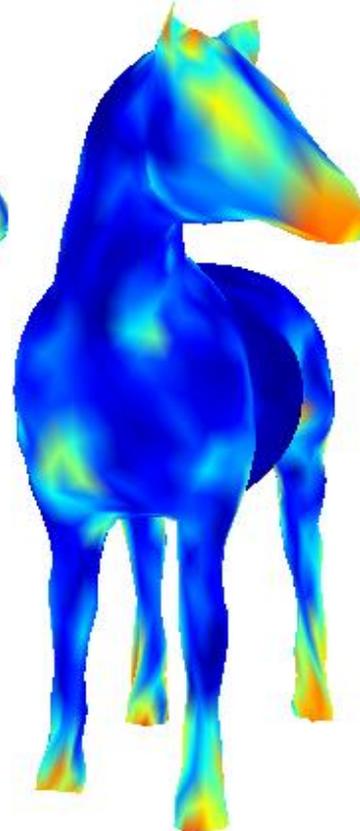
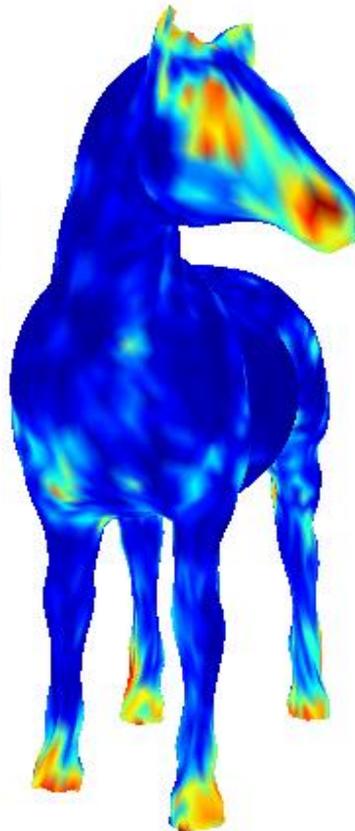
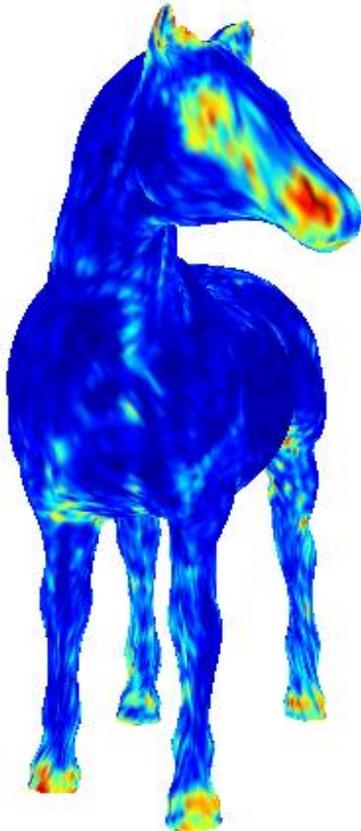
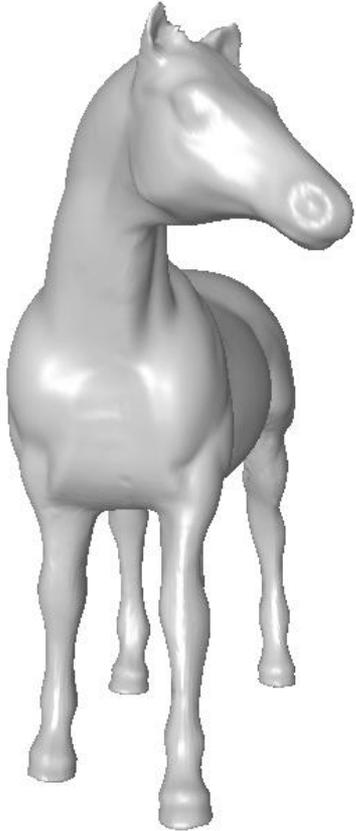
112 642 sommets

28 162 sommets

7 042 sommets

1 762 sommets

**Pondération
multirésolution**



Niveau n
original

Niveau n-1

Niveau n-2

Niveau n-3

...

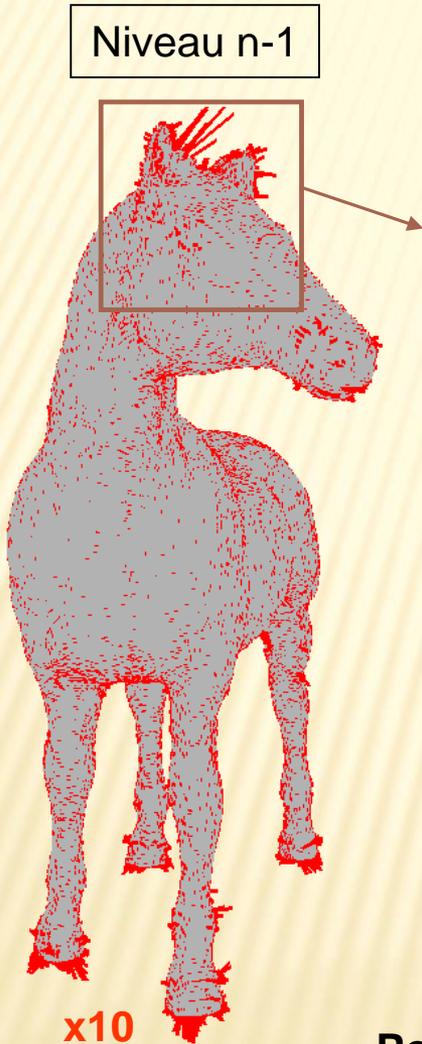
Niveau n-1



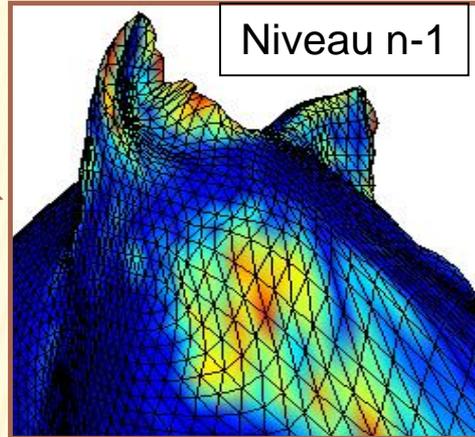
0

1

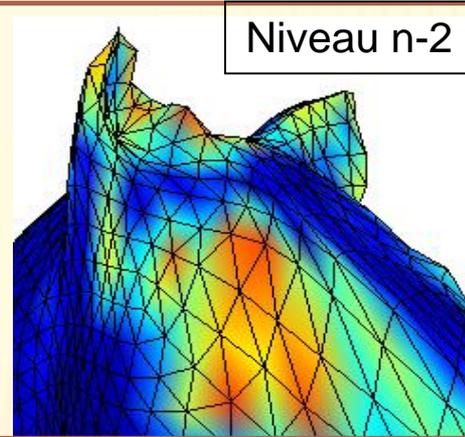
AMPLITUDE DES ONDELETTES (2)



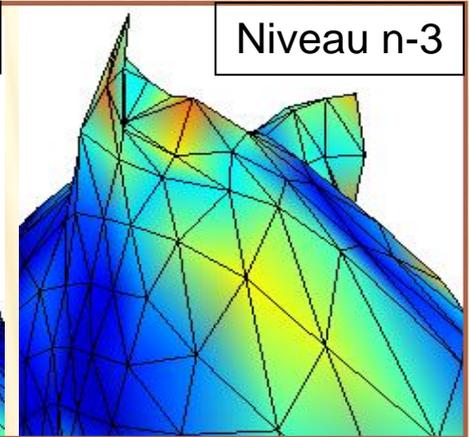
Niveau n-1



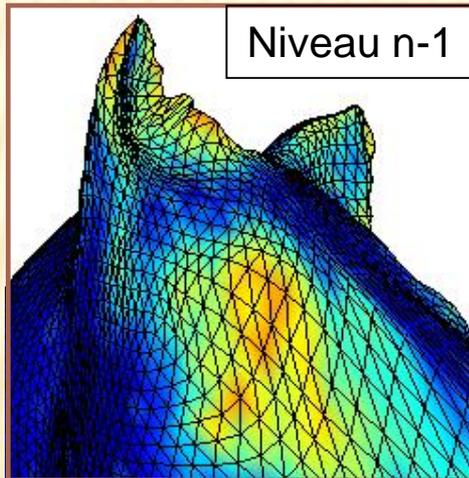
Niveau n-1



Niveau n-2



Niveau n-3



Niveau n-1

Pondération multirésolution

- Amplitude faible : zones lisses
- Singularités détectées :
 - arêtes vives
 - fortes courbures ...
- Critère de segmentation « basée fréquences »

PLAN

- ✗ **Etat de l'art en compression :**
 - + Codage mono-résolution
 - + Codage multi-résolution
 - + Codage par changement de modèle

COMPRESSION PAR CHANGEMENT DE MODÈLE

- ✘ **Objectif:**
Réduire la taille en passant d'un maillage à un autre modèle plus "léger"
- ✘ **Il s'agit de techniques d'approximation: la forme originale va être approchée par des surfaces paramétriques, implicites...**
- ✘ **Ces techniques sont généralement très coûteuses en termes de calculs**

APPROCHE « IMAGE »

- ✗ L'objet 3D est transformé en une image 2D (*paramétrisation*)
- ✗ Utilisation de techniques de compression d'images 2D (ondelettes)
[Hoppe, Praun, 2003][Peyre, 2005]



Modèle original

1800 Ko



Image géométrique



1 445 octets



2 949 octets

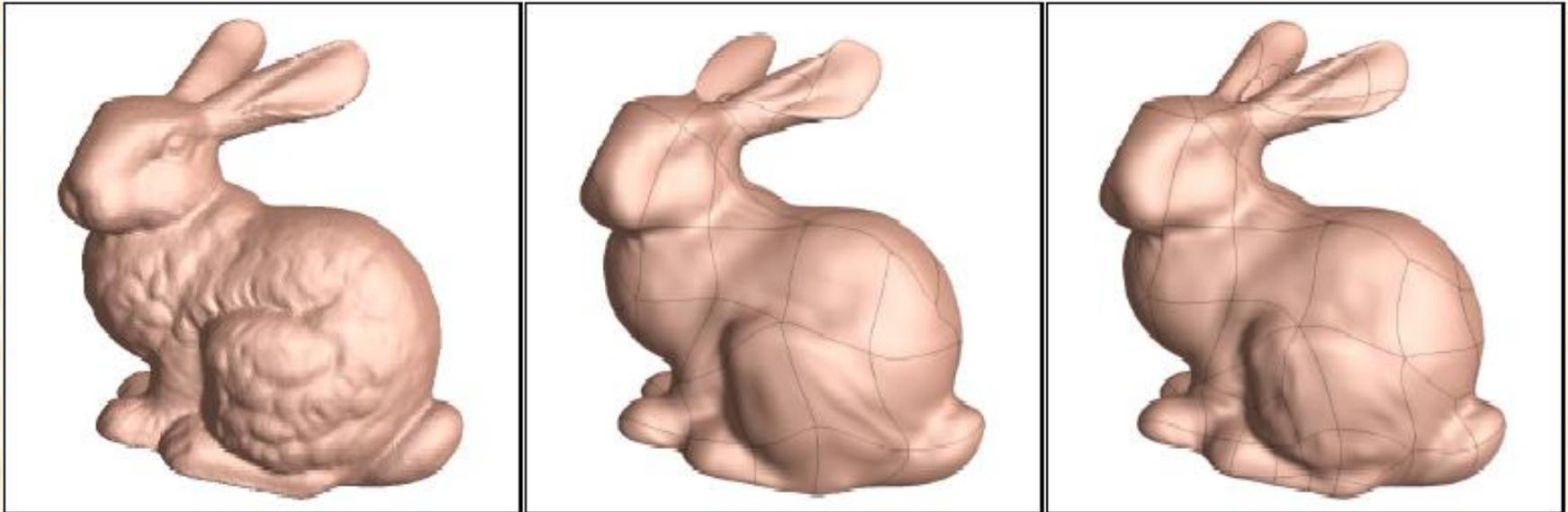


11 958 octets

Différents niveaux de résolution

Compression
=>99.3 %

APPROXIMATION DE MAILLAGE PAR B-SPLINES



70 000 triangles

72 carreaux

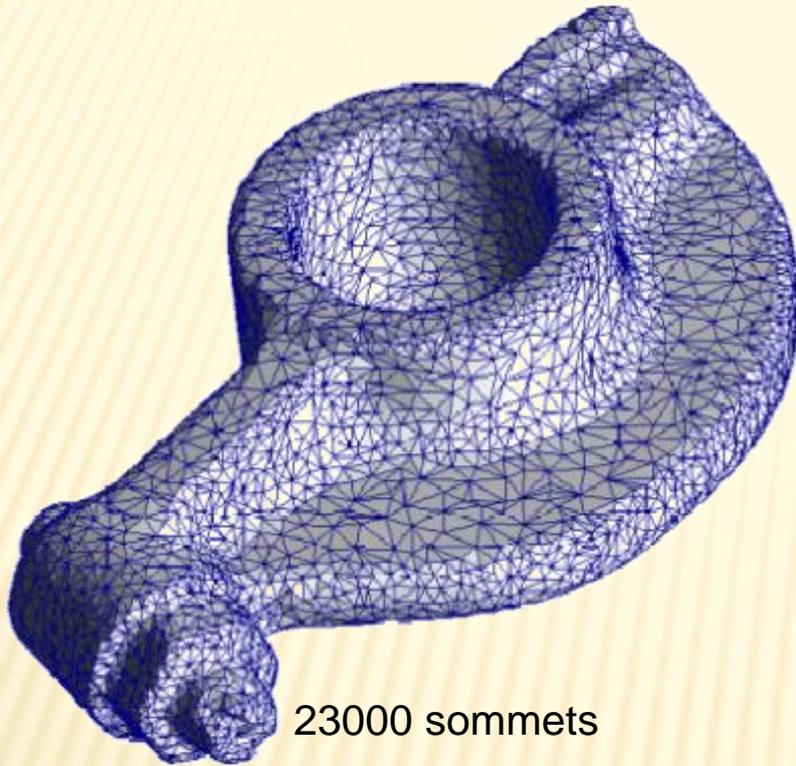
153 carreaux

[Eck, Hoppe, 1996]

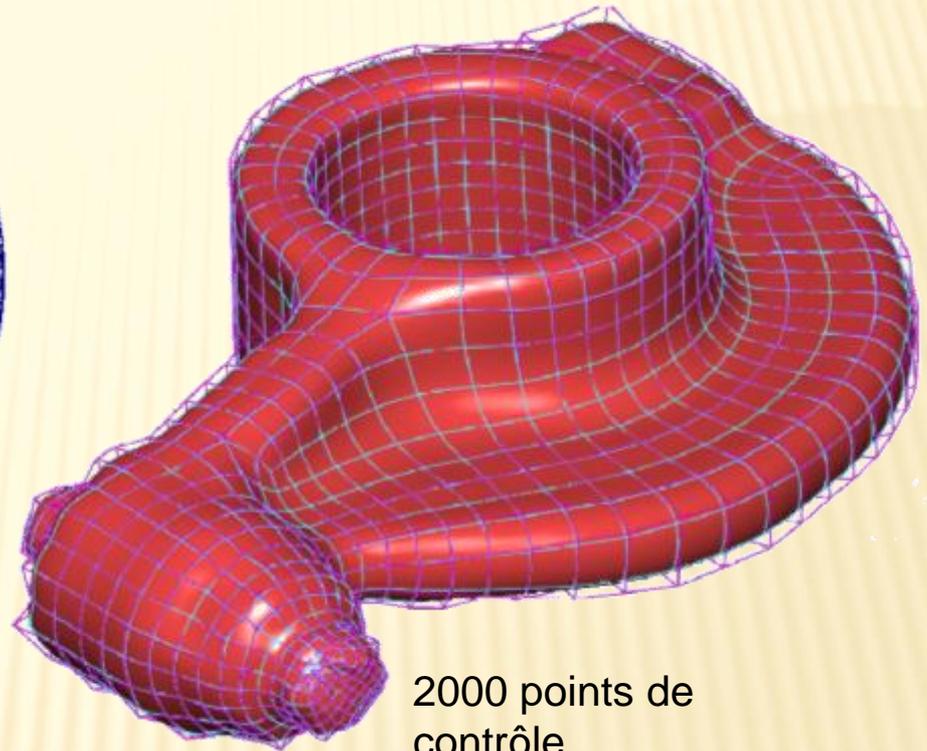
Intéressant pour la compression

Mais il faut fixer les frontières des carreaux

APPROXIMATION DE MAILLAGE PAR B-SPLINES



23000 sommets



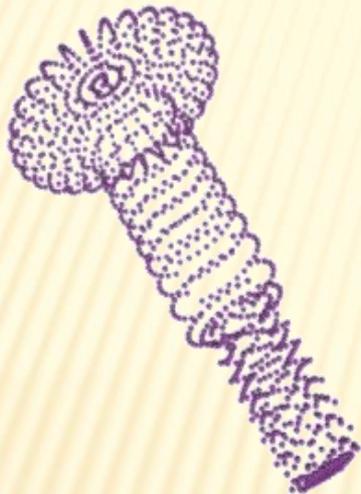
2000 points de
contrôle

[Li et al., 2006]

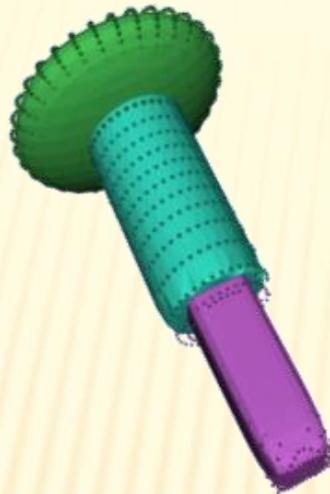
Les frontières des patches sont fixés d'après les lignes de courbure de l'objet

APPROXIMATION PAR SURFACES IMPLICITES

Segmentation et reconstruction de nuages de points 3D



(a)



3 primitives

(b)



(c)



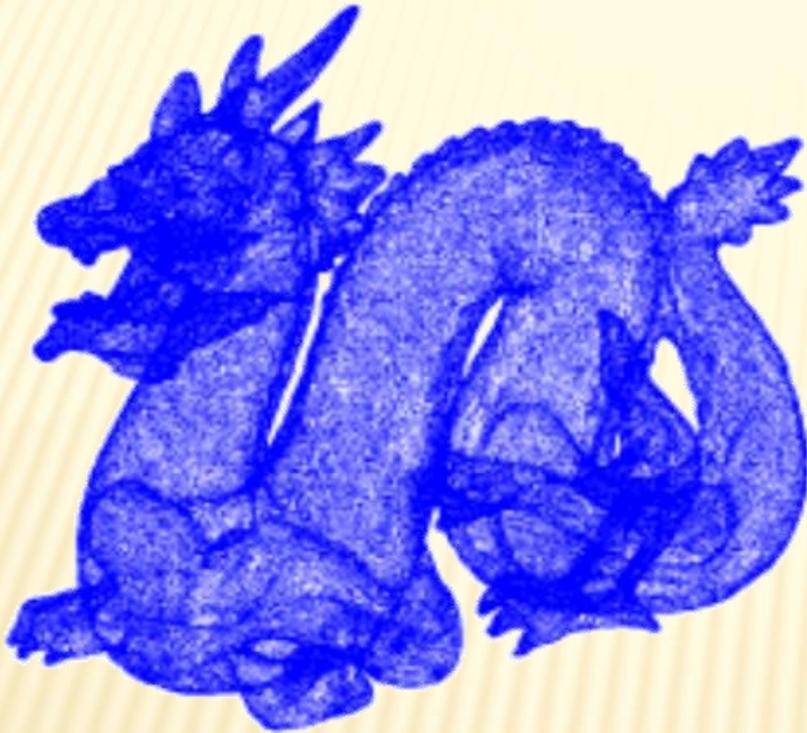
6 primitives

(d)

[Chevalier, 2001]

APPROXIMATION PAR SURFACES IMPLICITES

Reconstruction par un mélange de surfaces implicites



Original model
437 000 vertices



[Carr, 2001]

Implicit model
72 000 particles

APPROXIMATION PAR SURFACES DE SUBDIVISION



Original mesh
35 947 vertices



Subdivision control polyhedron
300 vertices



Subdivision limit surface

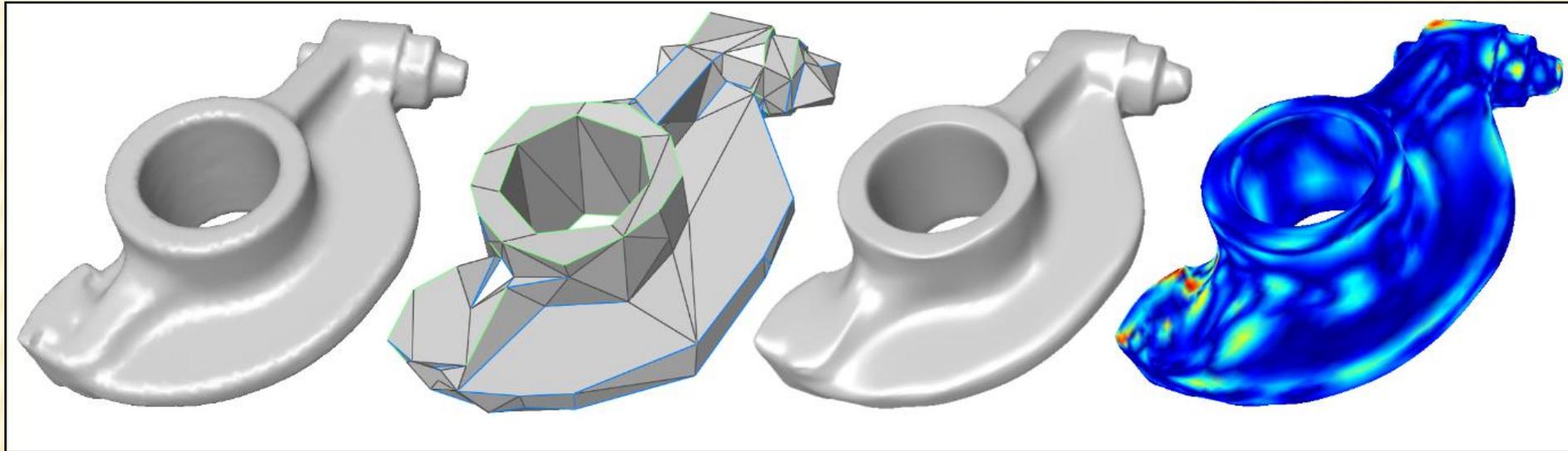
[Kanai, 2001]

Généralement 2 étapes:

Simplification du maillage original

Optimisation géométrique

APPROXIMATION PAR SURFACES DE SUBDIVISION



15000 Sommets

160 sommets

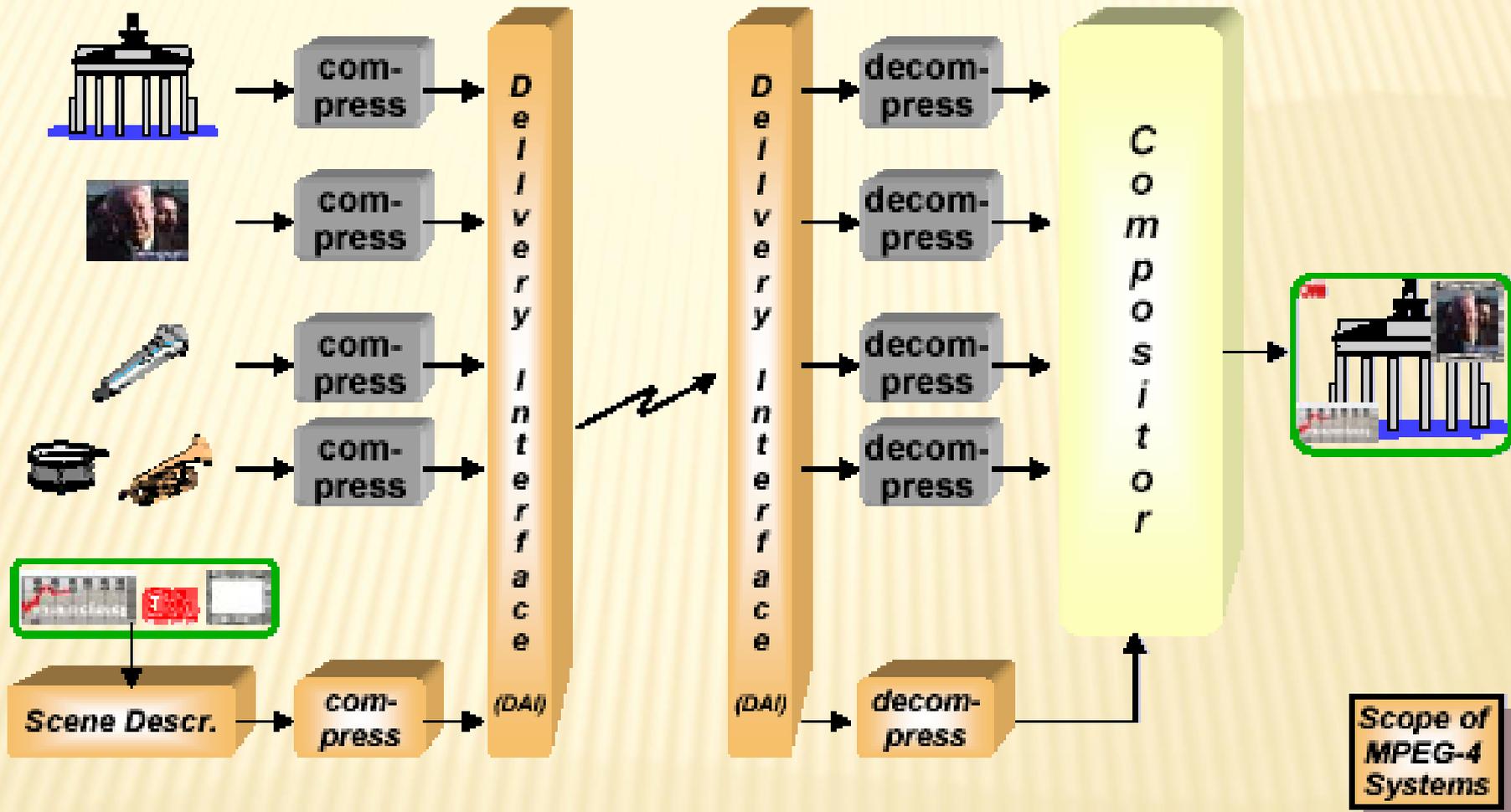
[Lavoué, 2009]

Taille non compressé => 1Mo

Taille Compression Mono-résolution => 35Ko

Taille Maillage de contrôle compressé => 900 octets

MPEG-4 COMPRESSION BASÉE CONTENU



MPEG-4 MIXAGE 2D-3D

- ✗ **Une scène MPEG-4 peut contenir des éléments 2D et 3D**
 - + Primitives 2D dans une scène 3D
 - ✗ Interface 2D dans un monde 3D
 - + Composition de plusieurs scènes 2D et 3D
 - ✗ Objet 3D dans une scène 2D
 - + Mapping de scènes 2D ou 3D sur des surfaces quelconques
 - ✗ Effets spéciaux

MPEG-4 COMPRESSION 3D

- × **MPEG-4 V2 fournit des outils pour la compression 3D**
 - + **Codage générique de maillage 3-D**
 - + **Scalabilité - Level of Detail (LOD)**
 - × **Le décodeur peut faire un rendu d'une version simplifiée du maillage**
 - × **Pour objets distants, avec des terminaux peu puissants**
 - + **Transmission progressive**
 - × **Pour recevoir un objet avec une qualité qui s'améliore**
 - × **2 approches :**
 - ★ **Transmission de LOD successifs**
 - ★ **Codage de maillage progressif**

PLAN

- ✗ **Compression de maillages statiques**

- + Codage mono-résolution

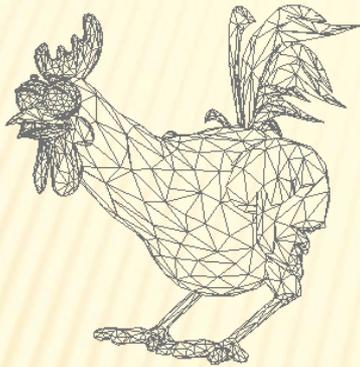
- + Codage progressif

- (Codage multi-résolution avec Marc Antonini)

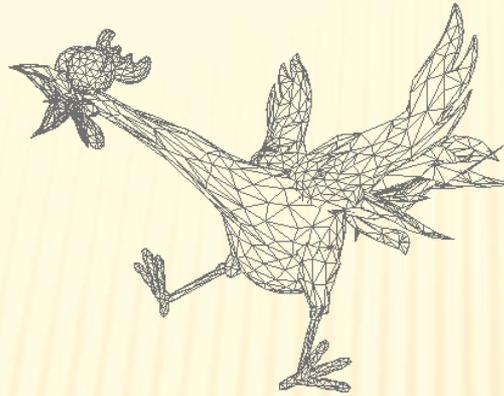
- ✗ **Compression de maillages dynamiques**

MAILLAGE DYNAMIQUE

✗ Liste de sommets par trame



Trame $f = 1$



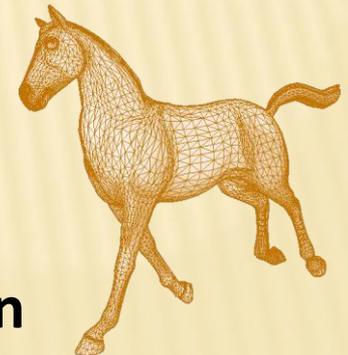
2



3

...

- ✗ Nombre de sommets : constant ou non
- ✗ Connectivité du maillage : constante ou non
- ✗ Nombre de composantes connexes : constant ou non



-
- ✘ Méthodes de prédiction spatio-temporelles
 - ✘ Approches à base de segmentation (clustering)
 - ✘ Méthodes fondées sur une Analyse en Composantes Principales (ACP)
 - ✘ Approches par ondelettes

MÉTHODES DE PRÉDICTION SPATIO-TEMPORELLES

✘ Prédiction par extrapolation

- + À l'instant t , la position des sommets est prédite à partir de certains voisins dans le maillage t et les maillages précédents

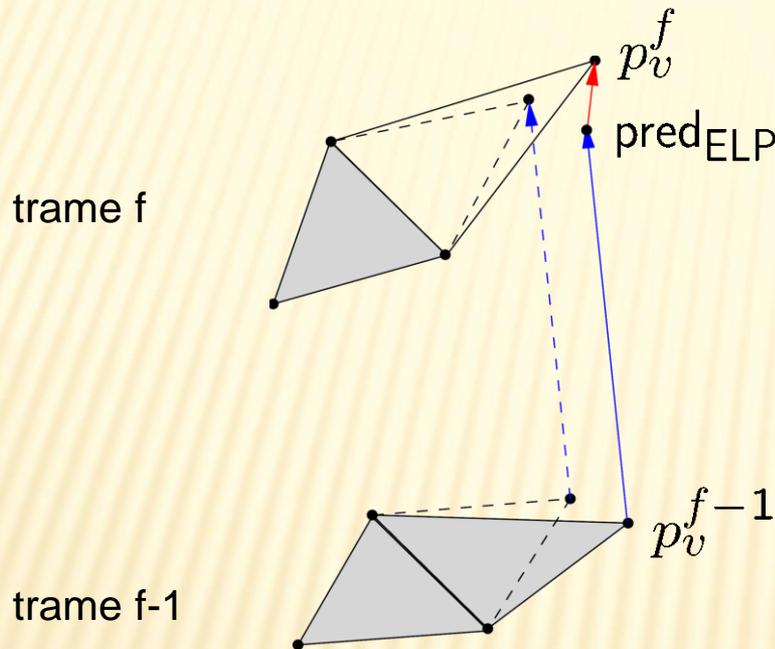
✘ Prédiction par interpolation

- + Sous échantillonnage temporel
- + Maillages intermédiaires interpolés entre maillages clés codés par des prédicteurs spatio-temporels

- + Importance de l'ordre de parcours

MÉTHODES DE PRÉDICTION SPATIO-TEMPORELLES

- ✘ **Prédicteur ELP : extension de la règle du parallélogramme (Extended Lorenzo Predictor)**

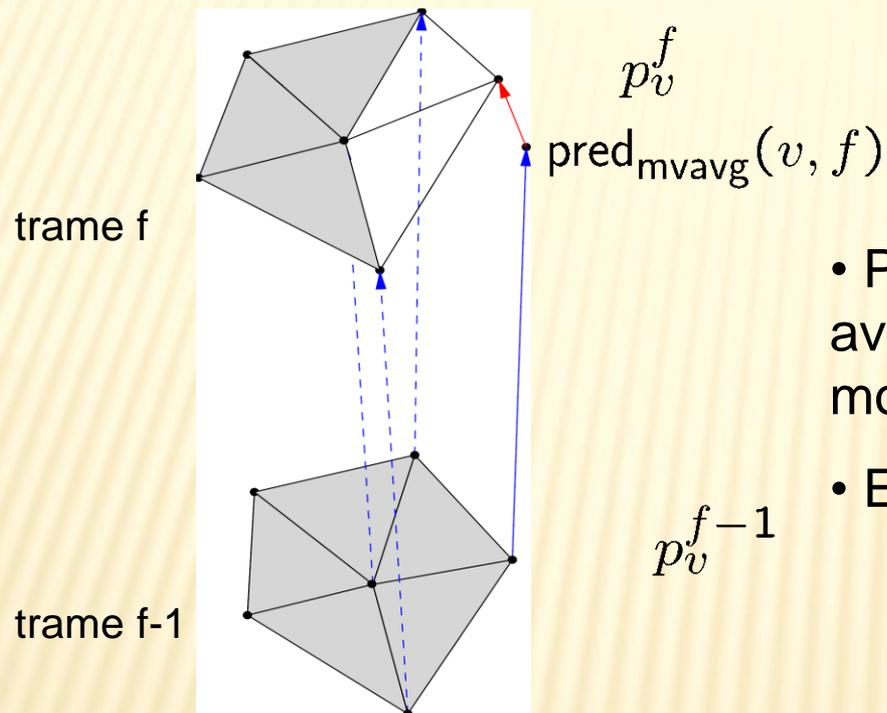


- Ligne bleue en pointillés : Prédiction du vecteur mouvement avec la règle du parallélogramme, reportée (ligne bleue pleine) sur le sommet de la trame précédente
- En rouge, vecteur différence

- ✘ **Prédicteur linéaire, parfait pour une translation entre f-1 et f.**

MÉTHODES DE PRÉDICTION SPATIO-TEMPORELLES

✗ Prédicteur : Motion-Vector Averaging

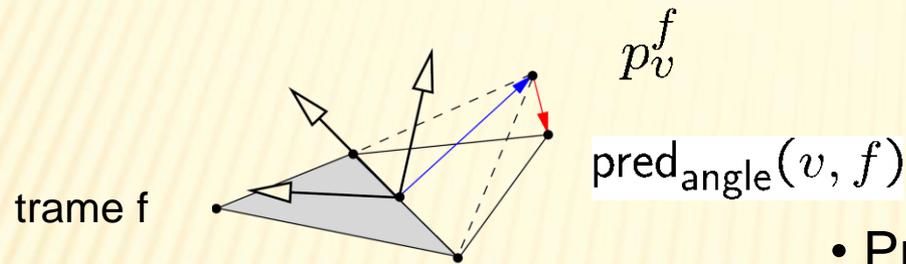


- Prédiction du vecteur mouvement avec une moyenne des vecteurs mouvement
- En rouge, vecteur différence

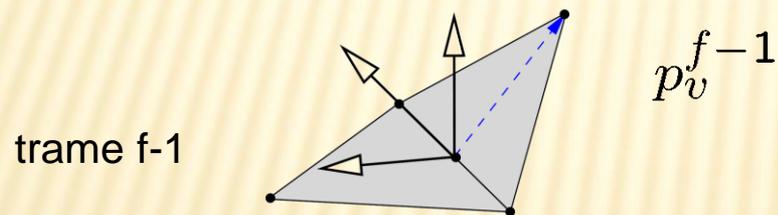
✗ Prédicteur linéaire, parfait pour une translation entre f-1 et f.

MÉTHODES DE PRÉDICTION SPATIO-TEMPORELLES

✘ Prédicteur : Angle Preserving Predictor



- Préservation de l'angle entre 2 triangles entre 2 trames
- En rouge, vecteur différence



- ✘ Prédicteur non linéaire, parfait pour une transformation rigide entre f-1 et f.

MÉTHODES DE PRÉDICTION SPATIO-TEMPORELLES

- ✘ **Ces méthodes nécessitent une correspondance sommet à sommet entre les maillages.**
- ✘ **Dans le cas contraire, une étape de remaillage est indispensable, mais très difficile à réaliser, voire impossible selon la nature des changements**

APPROCHES À BASE DE SEGMENTATION

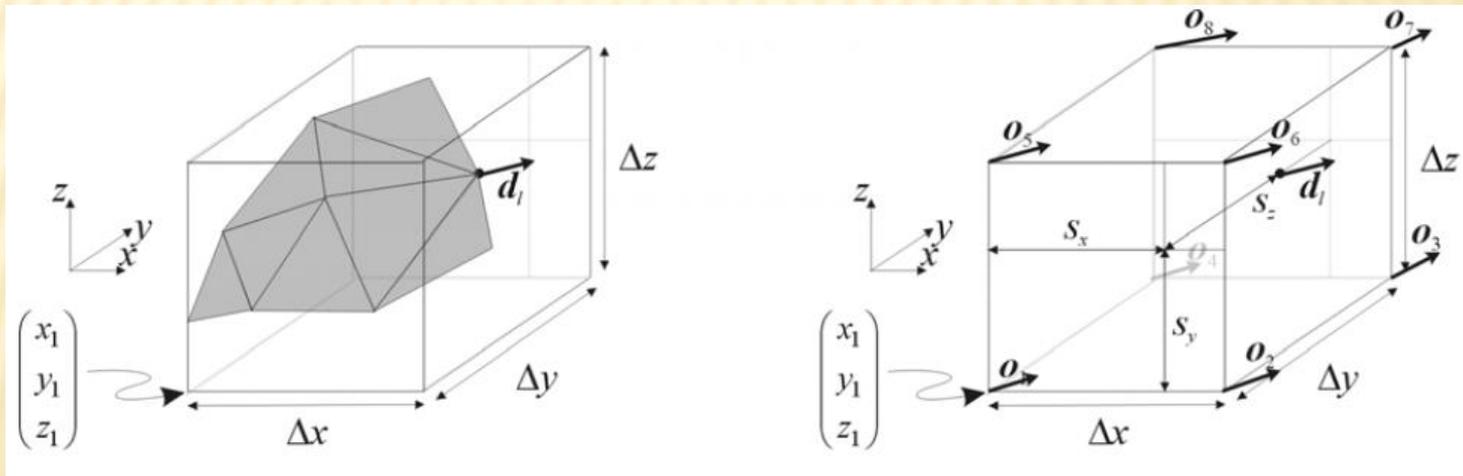
- ✖ **Codeur TS (Triangle Strip-based compression) [Ahn et al, 2001]**
 - + Le mouvement de chaque bande de triangle est codé par un vecteur vitesse moyen, avec un mécanisme de compensation de mouvement
 - + Les erreurs sont quantifiées puis transformées par DCT

APPROCHES À BASE DE SEGMENTATION

- ✗ **Compression of time-dependent geometry [Lengyel, 1999]**
 - + Segmentation en clusters de sommets dont le mouvement est estimé par une transformation rigide
 - + Les informations à coder sont alors :
 - ✗ La décomposition en clusters
 - ✗ Les transformations affines
 - ✗ Les erreurs résiduelles (compensation de mouvement)
- ✗ Utilisation de l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) pour le recalage [Gupta et al, 2002]
- ✗ Puis ajout d'un codage DPCM pour la compensation de mouvement
- ✗ **La correspondance sommet à sommet n'est plus nécessaire**

APPROCHES À BASE DE SEGMENTATION

- ✗ Octree-based animated geometry compression [Zhang et al, 2007]
 - + Les vecteurs « déplacement » sont placés dans une structure hiérarchique (octree)
 - + 8 vecteurs déplacement sont affectés aux sommets de la cellule courante de l'octree. Les cellules sont ensuite divisées récursivement. Le vecteur est alors une combinaison linéaire de ces 8 vecteurs.



APPROCHES À BASE DE SEGMENTATION

- ✗ Rate-distortion-optimized predictive compression of dynamic 3d mesh sequences. **[Smolic et al, 2006]**
 - + **3 manières de coder le mouvement :**
 - ✗ Soit par le vecteur de déplacement moyen de la cellule d'octree les contenant
 - ✗ Soit par le résultat d'une interpolation trilinéaire
 - ✗ Soit par le vecteur de déplacement de chaque sommet si les deux approches précédentes ne sont pas efficaces.

- ✗ **Approches à base de segmentation :**
 - + **bon compromis entre efficacité de calcul et taux de compression**
 - + **Dépend beaucoup de l'algorithme de segmentation**

MÉTHODES FONDÉES SUR UNE ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

- ✘ M. Alexa and W. Müller, Representing animations by principal components, Computer Graphics Forum 2000
 - + Compensation globale rigide à chaque instant
 - + Erreurs résiduelles exprimées dans la base des vecteurs propres de l'ACP
 - + Les coefficients des vecteurs des plus grandes valeurs propres sont conservées
 - + Toute la séquence doit être connue

- ✘ Z. Karni and C. Gotsman. Compression of soft-body animation sequences. Computers & Graphics 2004
 - + Amélioration avec un système de prédiction temporelle des coefficients ACP
 - + Codeur LPCA (Linear PCA) tient compte des corrélations temporelles des erreurs résiduelles.

MÉTHODES FONDÉES SUR UNE ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

- ✘ L. Vasa and V. Skala. Coddycac : Connectivity driven dynamic mesh compression. 3DTV Conference, 2007
 - + **Codeur CODDYAC : ACP dans l'espace des trajectoires de chaque sommet**
- ✘ M. Sattler, R. Sarlette, and R. Klein. Simple and efficient compression of animation sequences. Symposium on Computer animation, 2005
 - + Segmentation préalable, utilisation d'un repère local
- ✘ **Conclusion :**
 - + ACP donne de bonnes performances si le nombre de trames est grand par rapport au nombre de sommets
 - + Pas adapté pour un traitement au fil de l'eau (segmentation possible, mais l'inconvénient n°1 resurgit).

PERSPECTIVES

- × **Besoin de benchmark**
- × **Besoin d'accélération de la chaîne
compression/transfert/décompression**
- × **Maillages non manifold**
- × **Maillages autres que triangulaires**
- × **Maillages volumiques (tétra, hexa...)**
- × **Séquences de maillages (sans contrainte et au fil de l'eau)**