



Sculpture virtuelle

des modèles d'argile aux déformations de l'espace

Marie-Paule Cani

Univ. Grenoble-Alpes, CNRS & Inria



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—



Organisation du cours

« Façonner l'imaginaire »

Partie 1 : Création numérique 3D

- Modélisation géométrique constructive : choix d'une représentation
- **Cours 2 Sculpture virtuelle: des modèles d'argile aux déformations de l'espace**
Séminaire Équilibrage et supports de géométries pour l'impression des modèles 3D
Sylvain Lefebvre.
- Modélisation 3D à partir de dessins 2D
- Réutilisation et transfert des modèles 3D

Partie 2 : Mondes virtuels animés

- Création intuitive des éléments d'un paysage
- Animation efficace de phénomènes naturels : des détails qui s'adaptent
- Humains et créatures virtuelles : animation par habillages successifs
- Vers une animation expressive – marier réalisme et contrôle ?

Motivations

Modélisation constructive

- Créer des formes
- Les assembler
- Déformer localement ou globalement

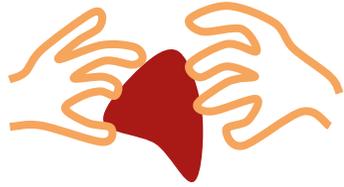


- Comment contrôler des déformations continues ?
 - Mieux adapté qu'effacer et recommencer

- Peut-on *tout faire par déformation* ?

→ Métaphore de *Sculpture Virtuelle*





Ce cours

Sculpture virtuelle

1. Modèles d'argile virtuelle

- Ajouter / enlever de la matière
- Simuler des déformations



2. Déformations de l'espace

- Déformer à volume constant
- Formes 1D, 2D, 3D imbriquées



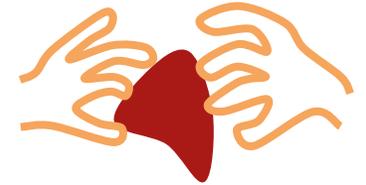
*Comment
représenter
la matière ?*

*Comment
interagir ?*

- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Inspiration : Modeler de l'argile

- Interaction directe avec une forme
- Ajouter / enlever de la matière (raccords, trous)
- Déformer à volume constant, localement ou globalement
- Lisser / ajouter des détails...



Avantages d'une argile virtuelle

- ne sèche pas, ne s'affaisse pas
- plus de problème de taille
- pas de zones inaccessibles
- défaire/refaire, copier/coller



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Argile virtuelle

Représentation géométrique ?

Besoins

- Surface délimitant un volume 3D
- Forme libre
- Permette les changements de topologie
 - Trouer, enlever un morceau, assembler...



→ *Surface implicite*

Iso-surface d'un champ scalaire $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$

$$S = \{ P / f(P) = c \} \quad V = \{ P / f(P) \geq c \}$$



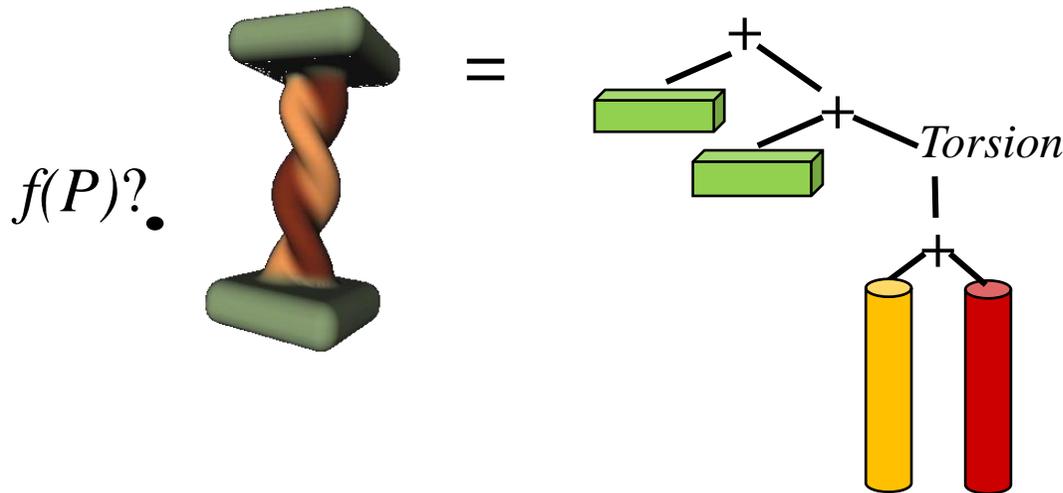
[Galeyan91]@ACM

- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Représentation géométrique*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Quel type de surfaces implicite?

Arbre de construction

- Le temps de calcul augmente à chaque opération



- Inutilisable pour de longues sessions de création !

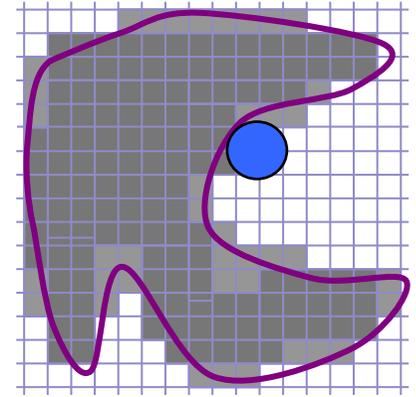
En 3h [Ferley 1999]

- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Représentation géométrique*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Quel type de surfaces implicite?

Iso-surface d'un champ discrétisé

- $f(P)$ par interpolation tri-linéaire
→ Temps constant quelque soit le nb d'opérations !
- f représente une *densité de matière*
 - Intuitif : 1 dedans, 0 dehors
 - Modifications locales à chaque opération (ajouter, enlever..)
- Affichage d'une surface lisse : $S = \{ P / f(P) = 0.5 \}$



- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Quelle représentation ?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Structures de données

Grille fixe : gaspille de la mémoire & restreint les actions

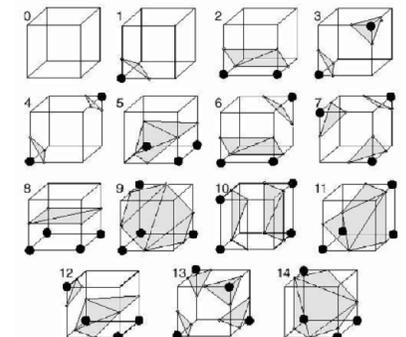
→ *Grille virtuelle, non-bornée!*

- Table de hachage stockant les cellules non vides
- Cellules créées ou supprimées quand nécessaire



cellules non-vides cellules de surface iso-surface

- Surface : *marching cubes* local (zones modifiées)

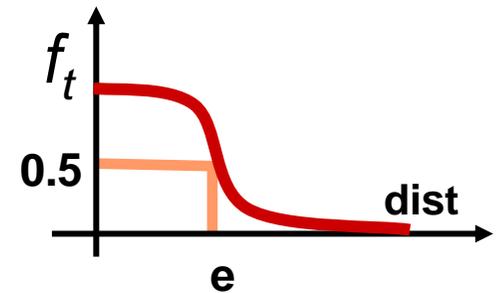


- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Comment interagir?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Outils de sculpture

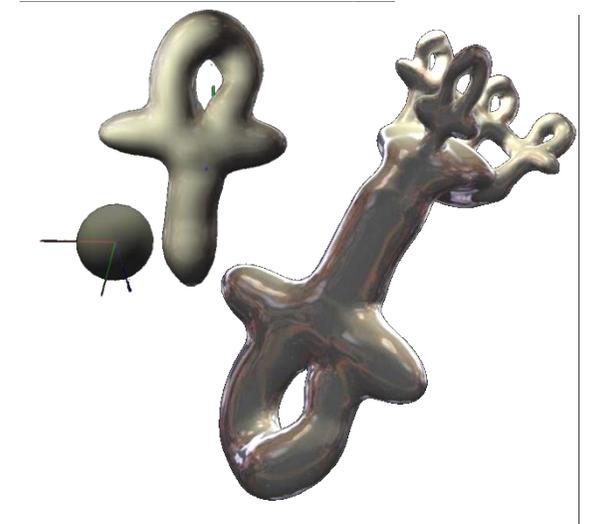
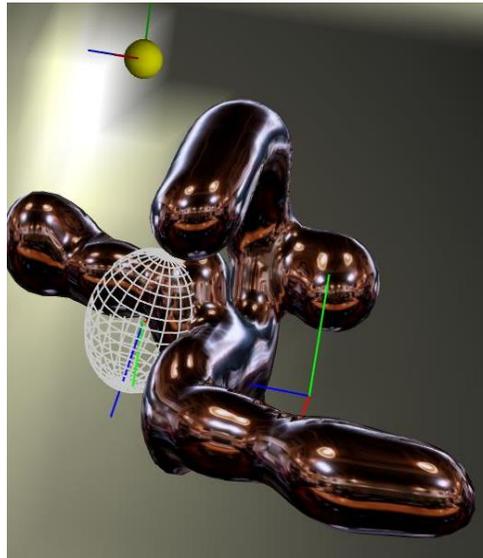
Analytiques ou discrets, définis par

1. Une contribution : champ f_t à support compact
2. Une action : comment le combiner avec f

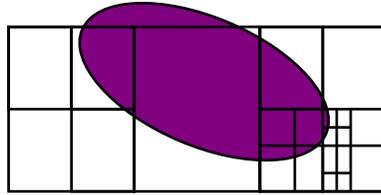


Actions possibles

- Ajouter (+)
- Enlever (-)
- Peindre
- Lisser (filtrage)



- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Comment interagir?*
- ✓ *Déformations de l'espace*



Multi-Résolution

Sculpture des détails fins

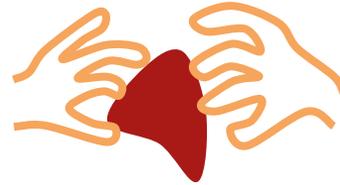
- Grille multi-résolution, de résolution non bornée (table de hachage)
 - Action progressive des outils (du grossier au fin)
 - Affichage adaptatif



[Ferley 2002]



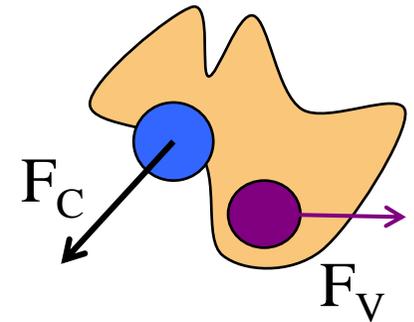
- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Comment interagir?*
- ✓ *Déformations de l'espace*



Retour d'effort

Pour mieux se repérer : *Sentir* l'argile virtuelle

- Calcul de deux forces
 1. **Force de contact** : le long du gradient de f
 2. **Frottement visqueux** : fct. densité de matière et vitesse outil



Bras à retour
d'effort (1000 Hz)
@Phantom

- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Comment interagir?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Comment combiner les forces?

Navigation

- Accentuer la force de contact
 - L'utilisateur sent la surface
 - Il peut s'y appuyer pour placer l'outil

Outil appliqué (ajout, gomme...)

- Accentuer le frottement visqueux
 - L'outil peut pénétrer la matière
 - L'utilisateur sent la densité traversée

→ *Retour d'effort « Expressif » !*



Sculpté en 1 heure

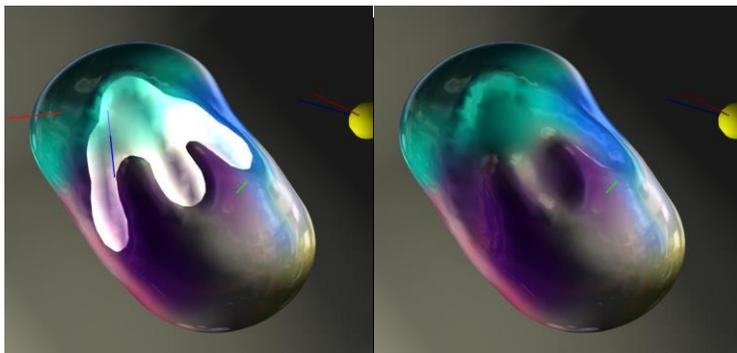
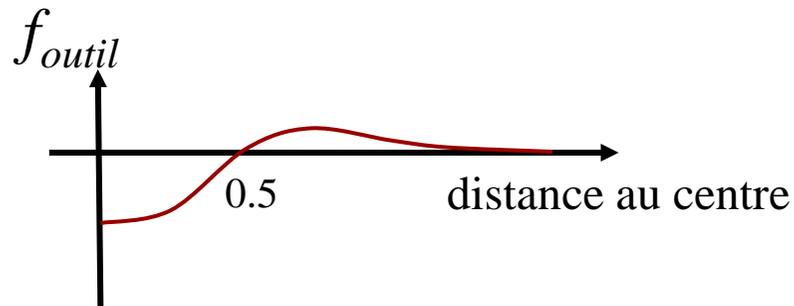
[Blanch 2004]

- ✓ *Argile virtuelle*
 - *Comment interagir?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

L'argile réelle se déforme!

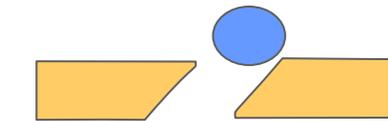
“Pousser” la matière avec un outil rigide ?

- Déformation géométrique imitant la physique (bouvrelet)

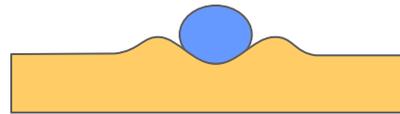


- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*

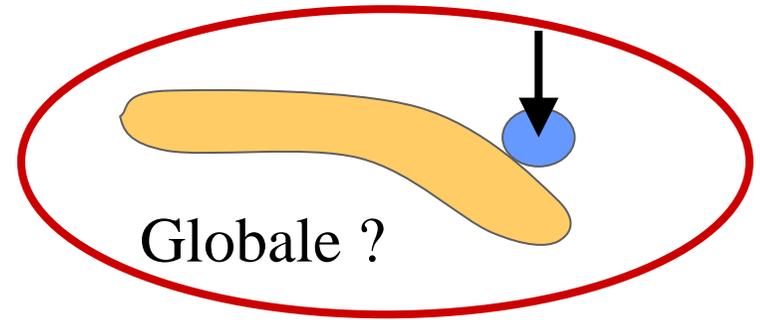
Déformations globales



Ajout/Gomme

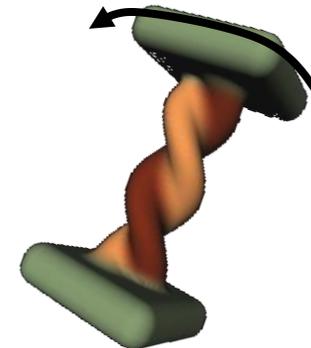


Déformation locale



Globale ?

- Comment les modéliser?
 - Effet de propagation
 - Volume constant au cours du temps



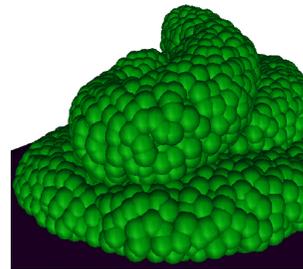
- ✓ *Argile virtuelle physique*
 - *Quelle représentation ?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Simuler les déformations

Ex: Fluides SPH

- Masses ponctuelles
- Loi de densité cte
→ forces d'interaction
- Squelettes d'une surface implicite

[Clavet 2005 @ACM]



≠



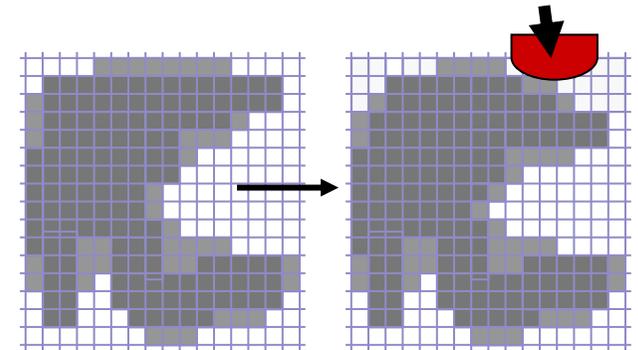
Peu adapté

- Trop d'effets dynamiques
- S'étale trop
- Coût non constant (ajout de matière)

- ✓ *Argile virtuelle physique*
 - *Quelle représentation ?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Modèle pseudo-physique

Idée : Reprendre la représentation volumique
Agir sur la densité de matière



Lois physiques qualitatives

1. Propagation à grande échelle et plasticité
2. Conservation de la masse (donc du volume)
3. Tension de surface



En temps réel : *Modèle multicouches*

- ✓ *Argile virtuelle physique*
 - *Quelle représentation ?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

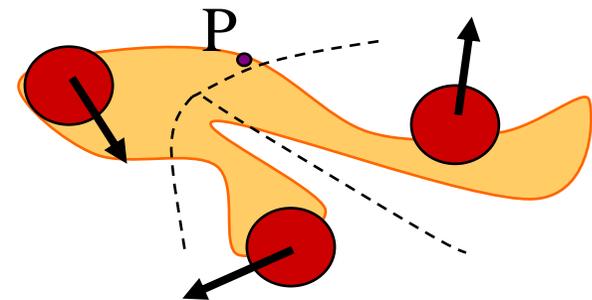
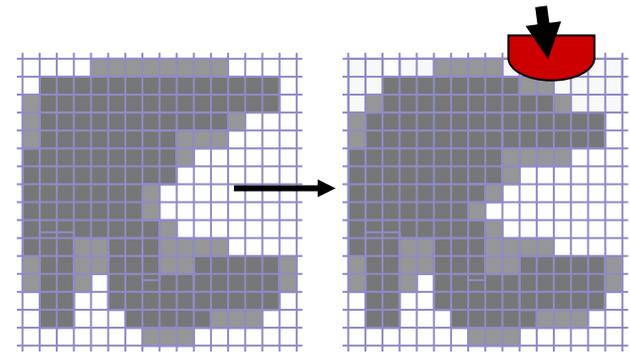
Couche 1 : Propagation et plasticité

Objectifs

- Comportement plastique temps-réel
- Pas besoin de dynamique

→ *Diffuser le mouvement des outils*

Influence fonction du plus court chemin dans la matière

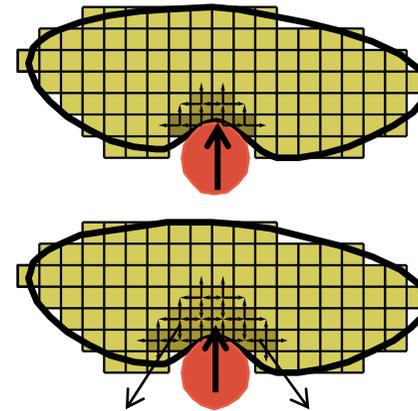


- ✓ *Argile virtuelle physique*
 - *Quelle représentation ?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Autres couches

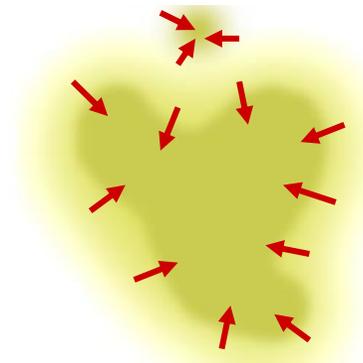
2. Conservation du volume

- Automate de diffusion
- Crée des déformations locales



3. Tension de surface

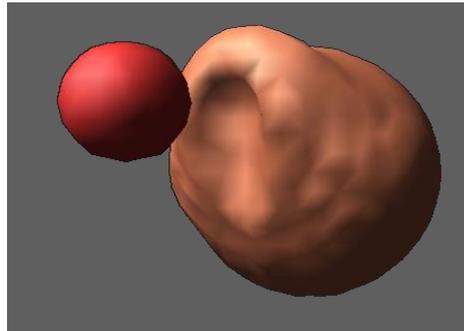
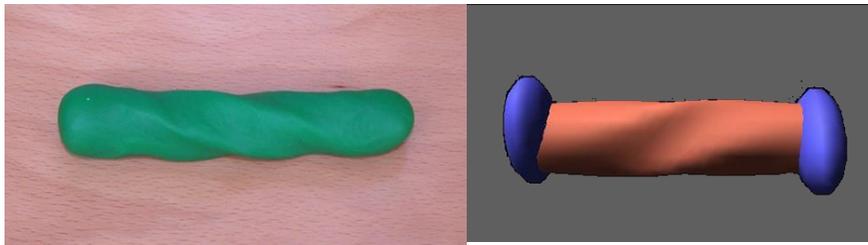
- Pour toute densité < 0.5
diffusion orientée gradient
- Assure la cohésion



- A chaque instant
- Couches 1, 2, 3
activées en série

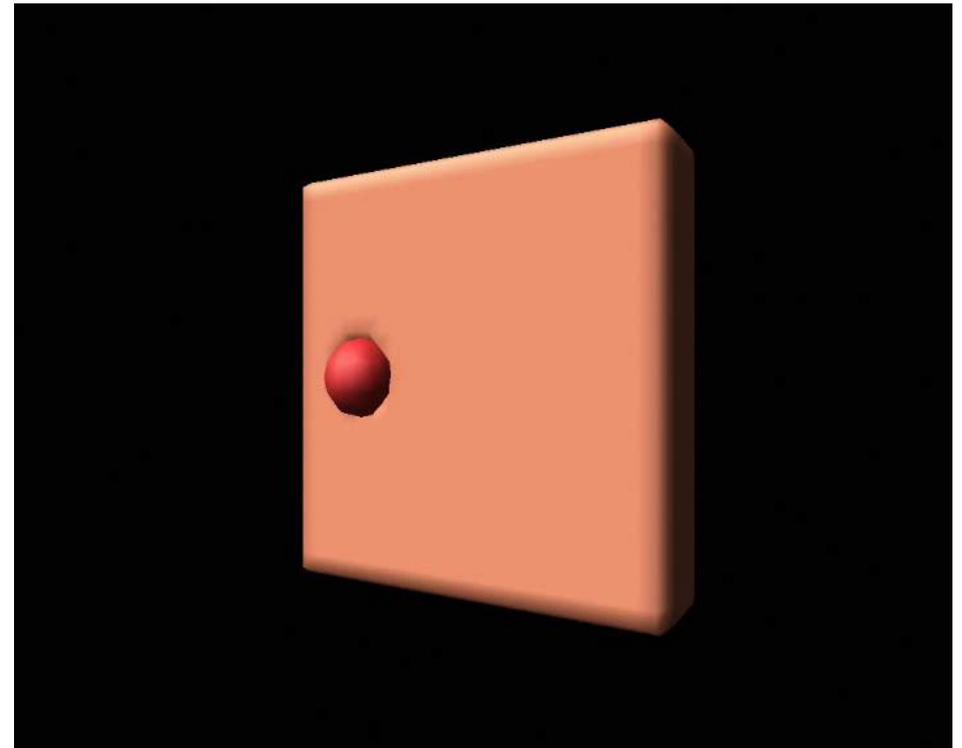
- ✓ *Argile virtuelle physique*
 - *Quelle représentation ?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Résultat : Argile virtuelle plausible



Real clay

Virtual clay



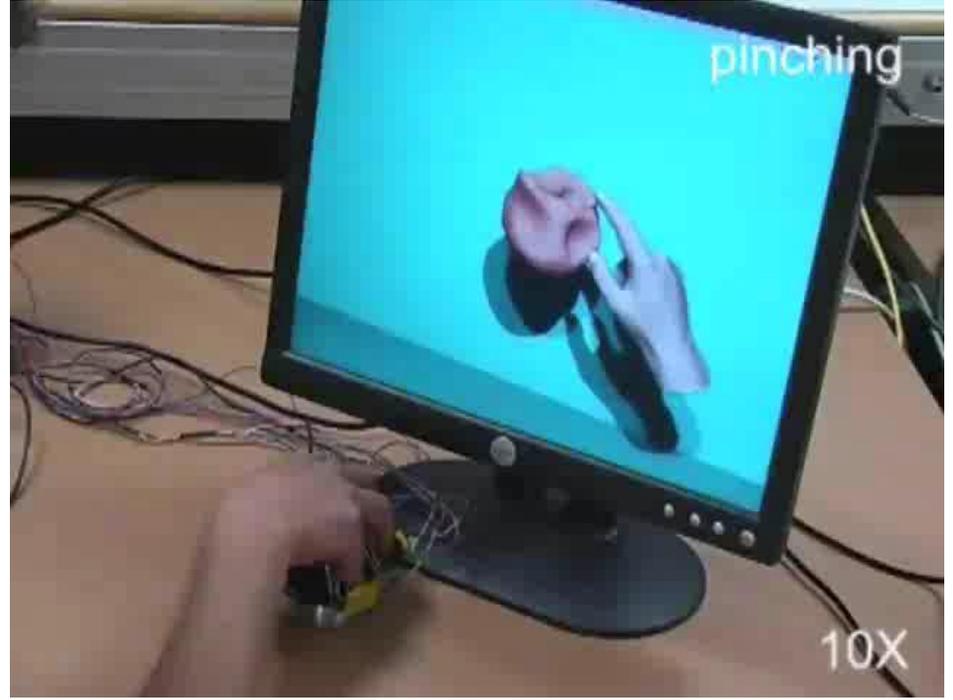
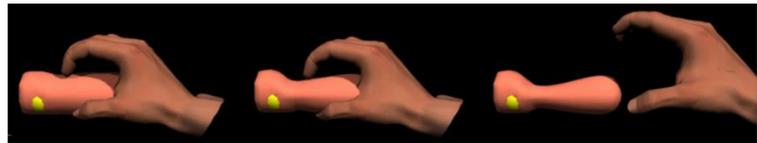
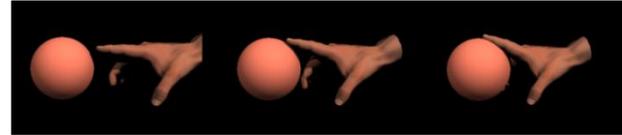
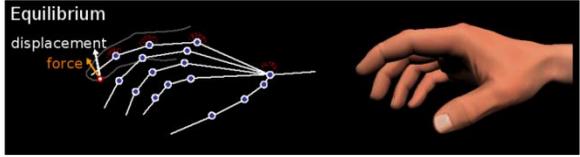
[Dewaele 2004]

- ✓ *Argile virtuelle plausible*
 - *Comment interagir?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Il faut plus d'un doigt pour sculpter!

Contrôler une main virtuelle : "Hand-navigator"

[Kry 2009]



Hapti-hand [Chardonnet 2012]
+ vibreurs, retour d'effort



- ✓ *Argile virtuelle plausible*
 - *Comment interagir?*
- ✓ *Déformations de l'espace*

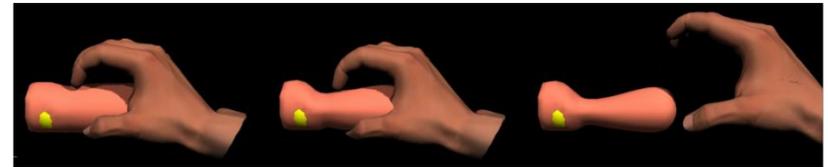
Argile virtuelle : Bilan

- Plus la matière virtuelle est réaliste
.... plus l'interaction doit être proche du réel
Recherche intéressante... *mais décevant comme outil de création*



A inspiré des logiciels :

- *Zbrush*
- *Sculptris*
- *Mudbox*



Transfert vers société *Haption*

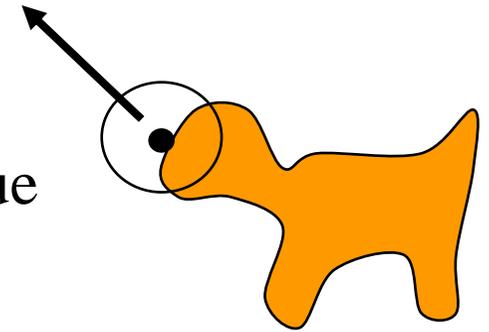
- Déformations faciles à contrôler par gestes?
 - *S'inspirer seulement du réel !* (localité, volume constant...)

- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Sculpter via des déformations de l'espace

Objectifs

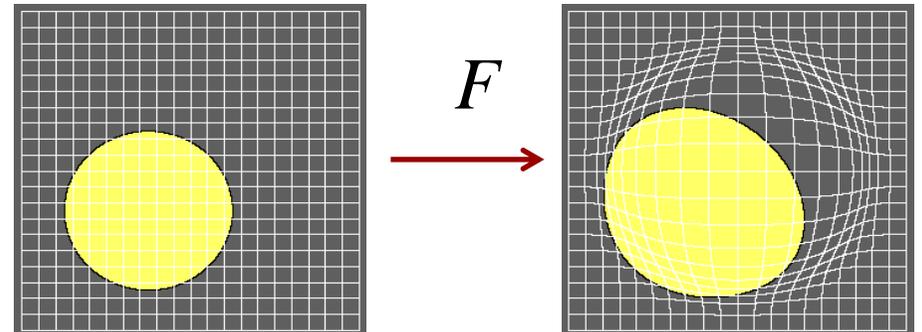
- Interaction gestuelle intuitive
- Applicable à toute représentation géométrique
- Déformations intuitives



Déformation de l'espace $F: \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}^3$

- Maillages, surfaces splines
 - Appliquer F aux sommets
- Surfaces implicites

$$\hat{f}(P) = f(T^{-1}(P))$$



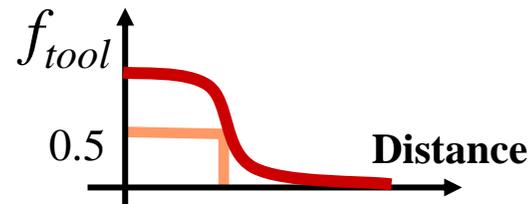
- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Comment interagir?*

Sculpter par gestes

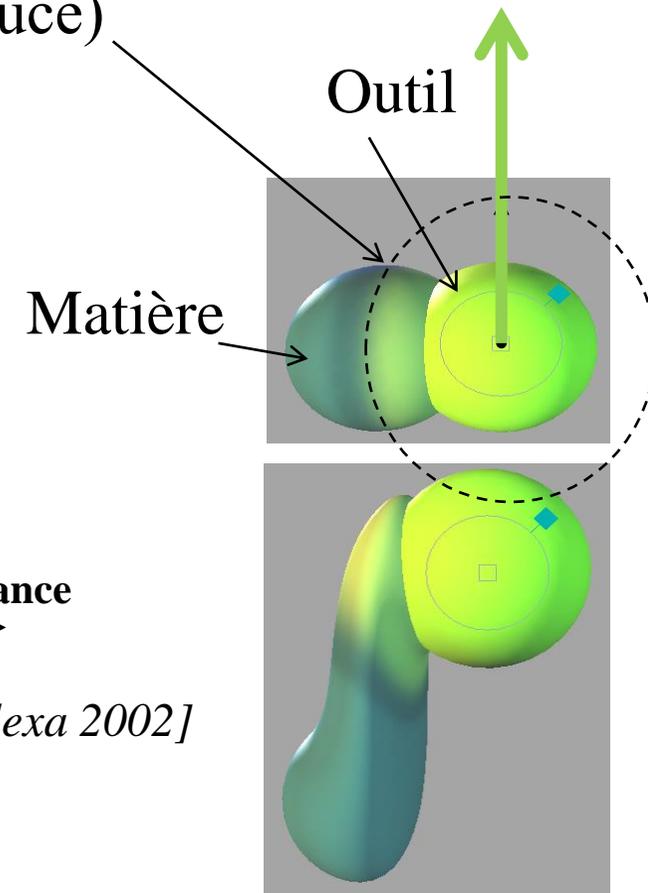
- Outil = forme + région d'influence (limite douce)
- Trajectoire définie par un geste de balayage

$$F(P) = [f_{tool}(P) \odot M_{tool}] (P)$$

$f_{tool}(P)$: influence locale de l'outil



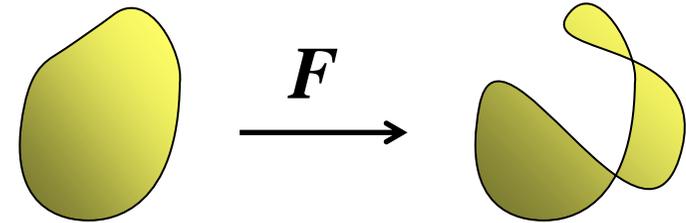
- Puissance de matrice de transformation [Alexa 2002]
 - A l'effet d'une multiplication scalaire



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Comment interagir?*

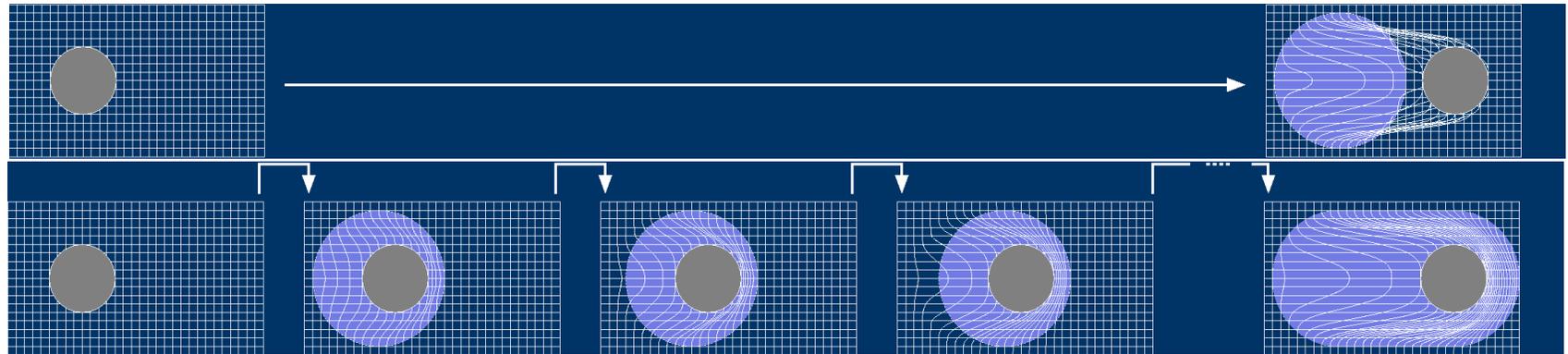
Sculpter par gestes

Déformations réversibles



- Ne pas *replier l'espace*

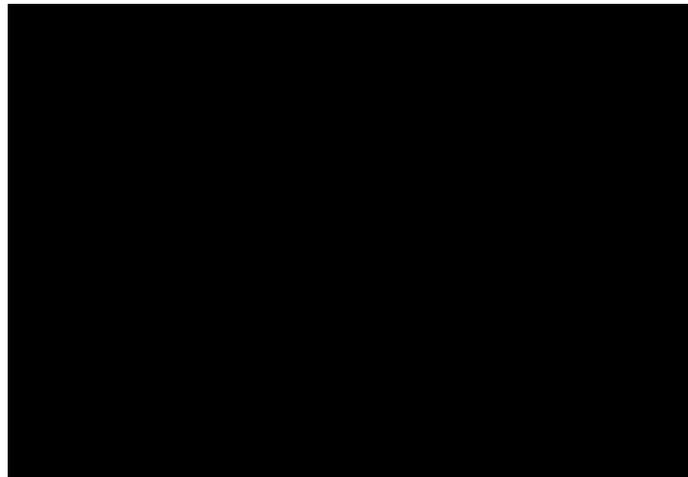
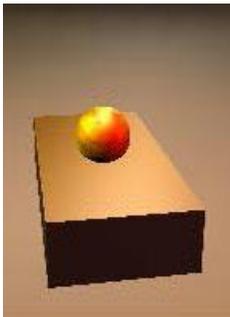
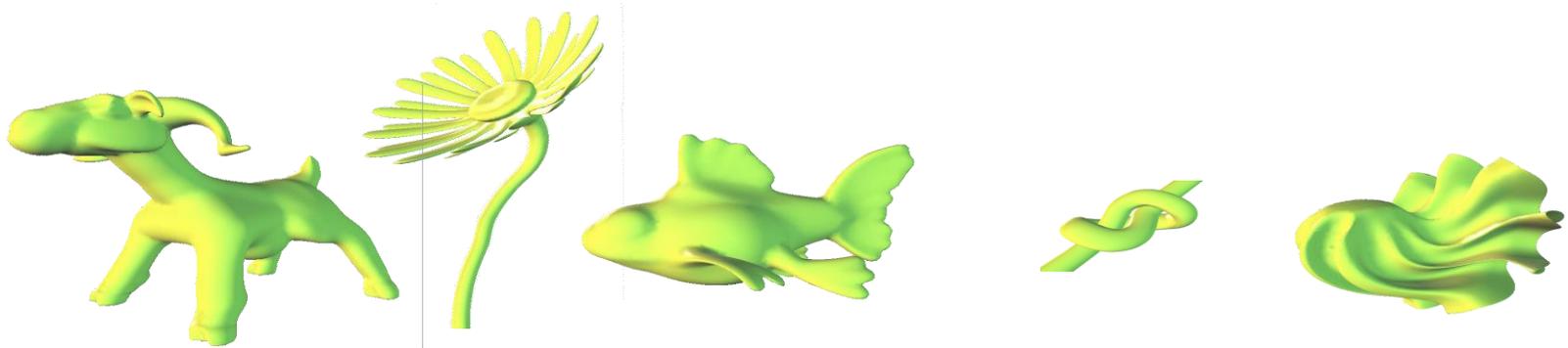
→ Appliquer chaque déformation par petits pas



- Interdit les changements de genre topologique (fusions...)

- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Comment interagir?*

Sculpter par gestes : Résultats



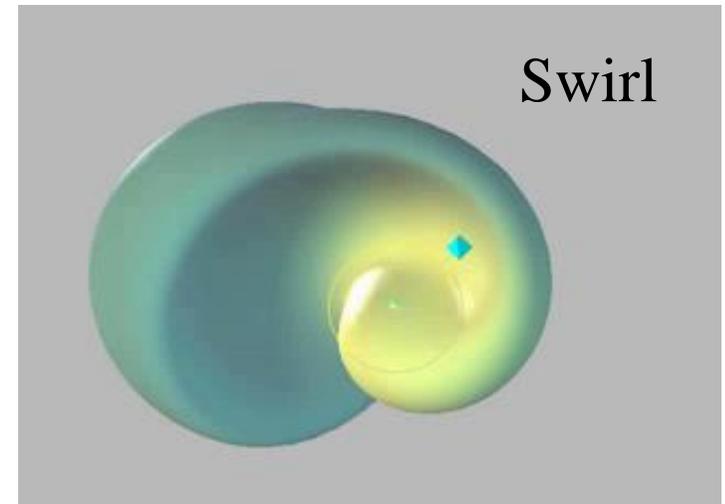
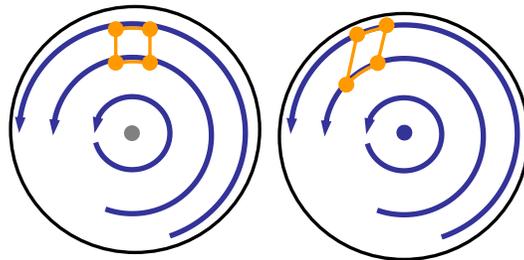
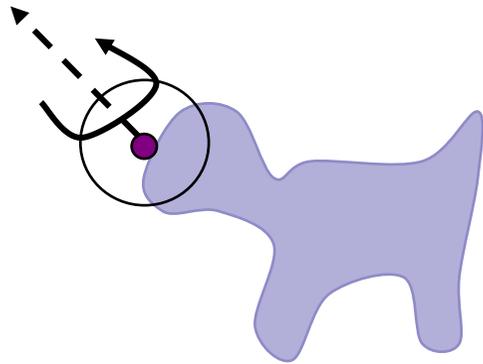
[Angelidis 2004]

- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Volume constant*

Déformations plus intuitives?

“Swirl”

- Torsion à *volume constant* (axe + angle de rotation)
 - Déterminant (Jacobienne F) = 1

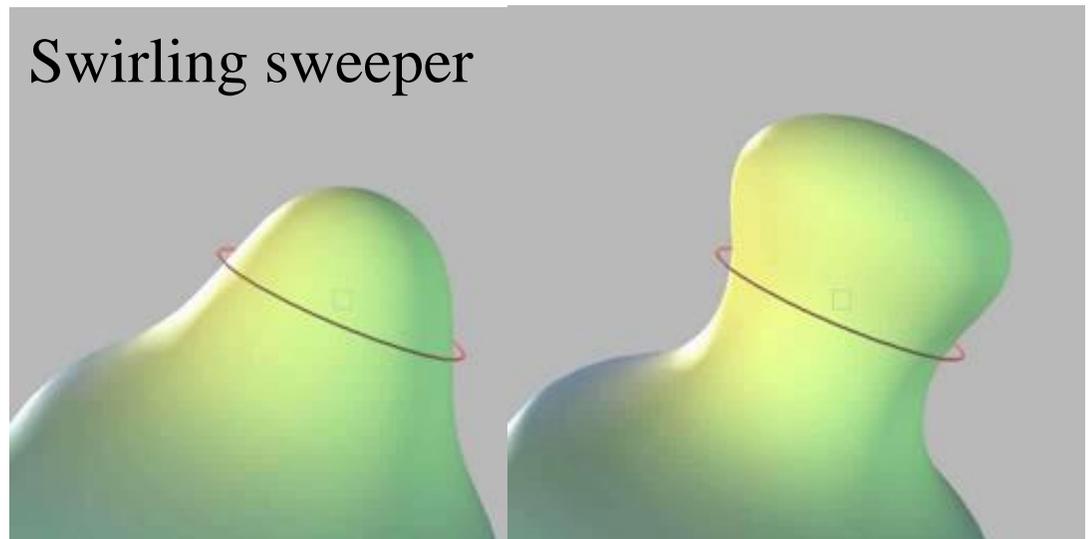
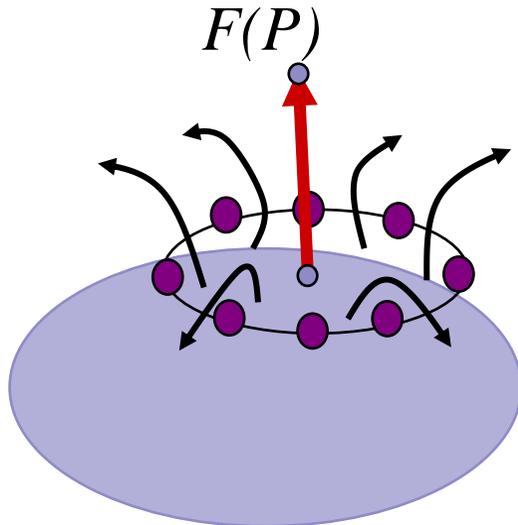
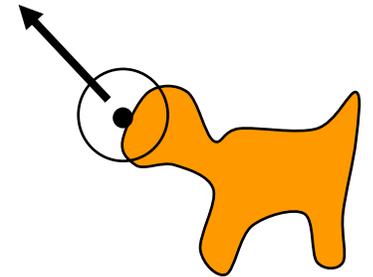


- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Volume constant*

Sculpter par balayage ?

“Swirling-sweepers”

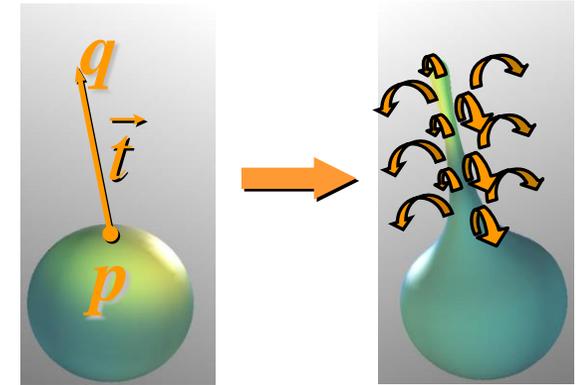
- Anneau de swirls synchronisés
- Composés par addition de leurs actions



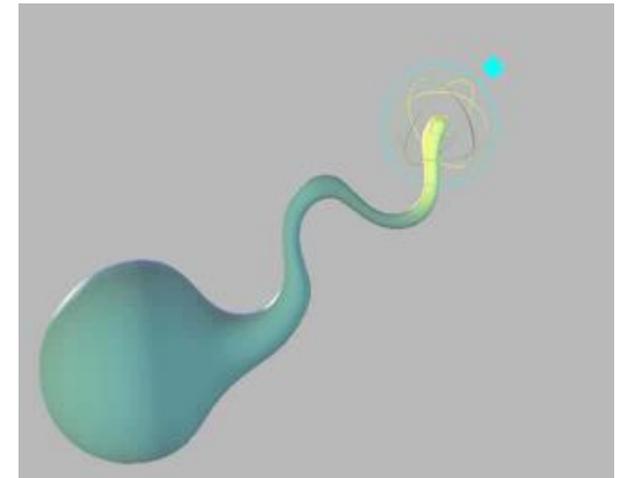
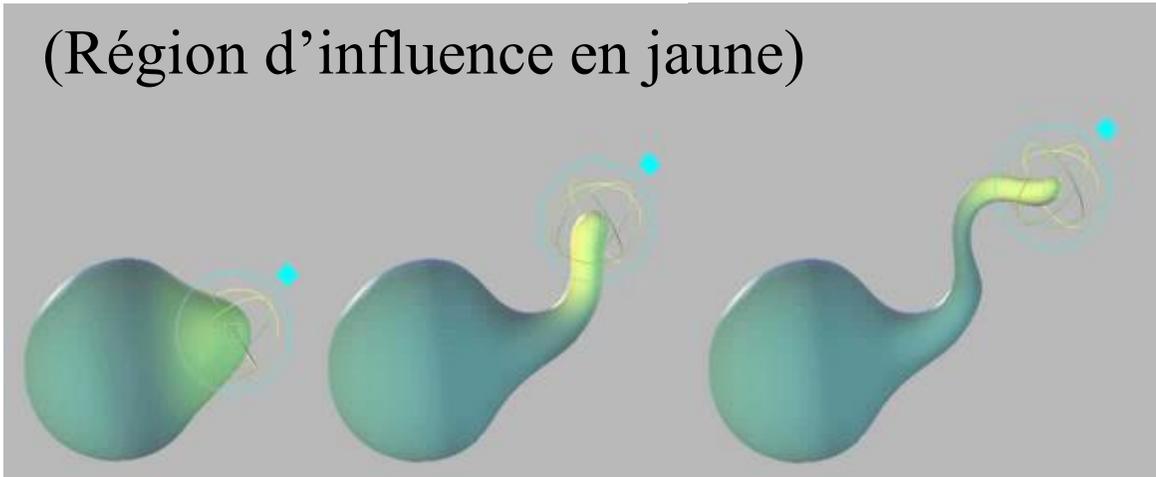
- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Volume constant*

Swirling sweepers : résultats

- Pour sculpter via des translations
 - Les décomposer en anneaux de swirls
 - Calculer l'angle adéquat

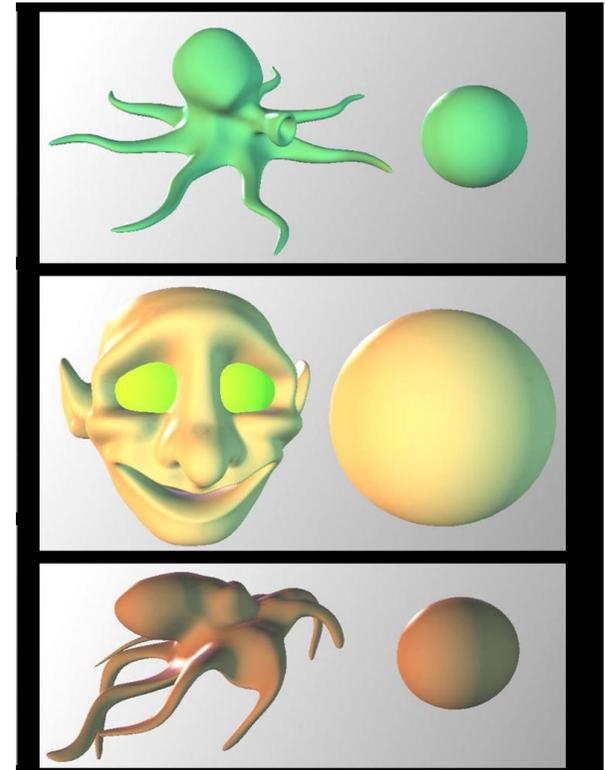


(Région d'influence en jaune)



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Volume constant*

Swirling sweepers : résultats



[Angelidis 2004]

- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Quelle représentation ?*

Pour bien capturer une déformation

Maillage adaptatif, plongé dans le champ de déformation

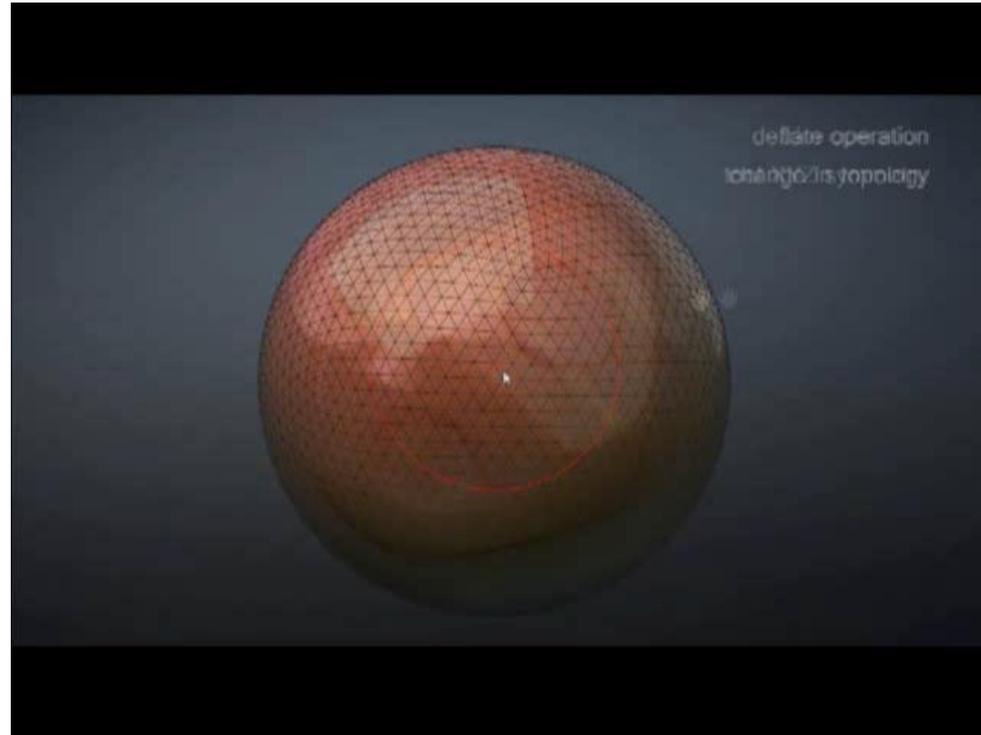
1. Toutes les arêtes restent plus petites que d (niveau de détail)
2. Elles tentent de rester plus grandes que $d/2$

Permet de traiter les changements de topologie au niveau du maillage



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Quelle représentation ?*

Maillage quasi-uniforme : Résultats



[Stanculescu 2011]

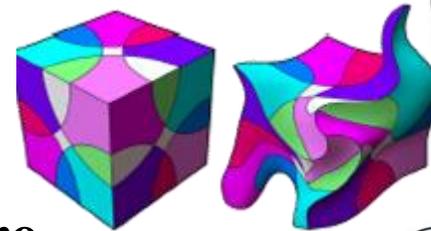
Restreint à de la matière homogène, isotrope!

- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*

Sculpter des formes portant des détails ?

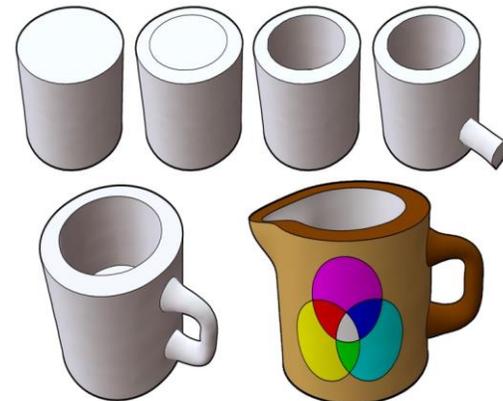
Motivation : Détails sur les formes 3D

- Points – *marques, points singuliers*
- Courbes – *lignes de construction, arêtes vives*
- Régions – *apparence ou fonction*



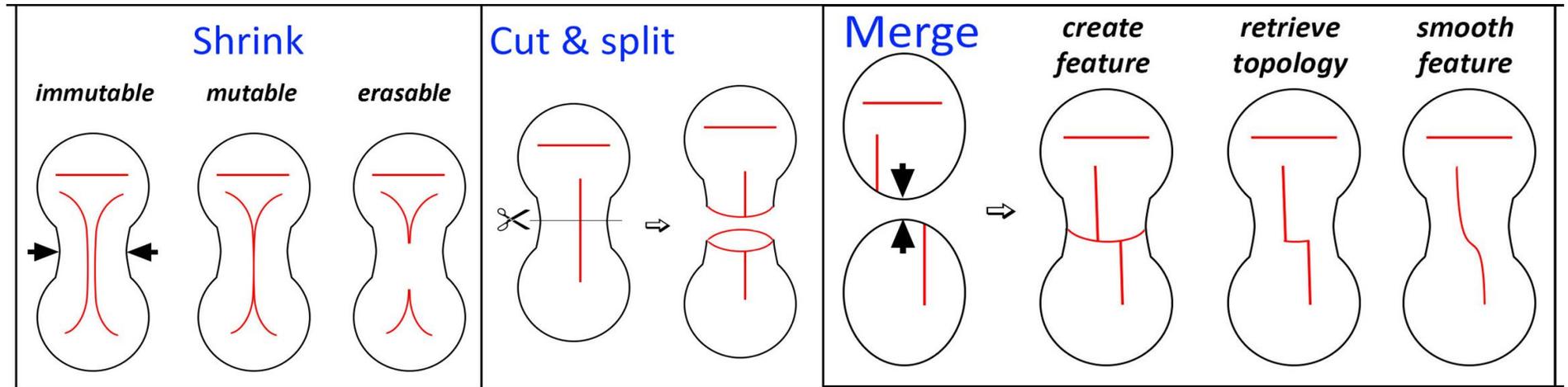
But : les conserver pendant la sculpture

- Eviter que les détails soient lissés ou floutés
- Changements de topologie consistants
en cas de contraction, fusion, séparation du support

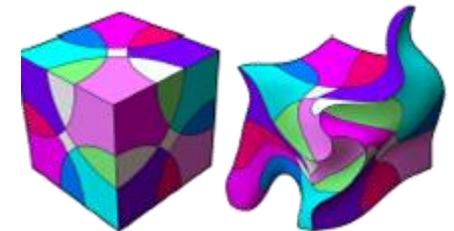


- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Formes portant des détails*

Taxonomie des comportements désirés



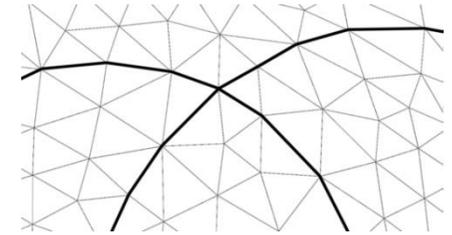
Comment permettre ces comportements?



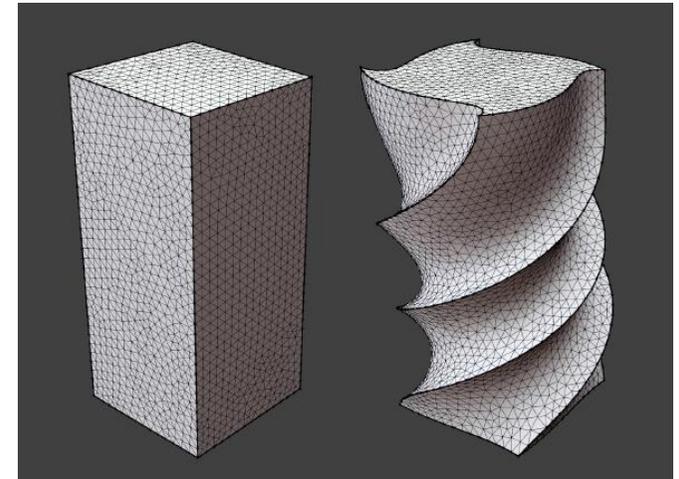
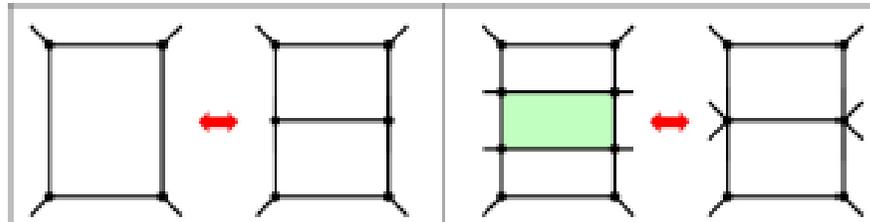
- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Formes portant des détails*

Complexes cellulaires imbriqués

- Détails dim n = bord de cellules $n+1$
Hiérarchie de cellules, marques de « *détail* »



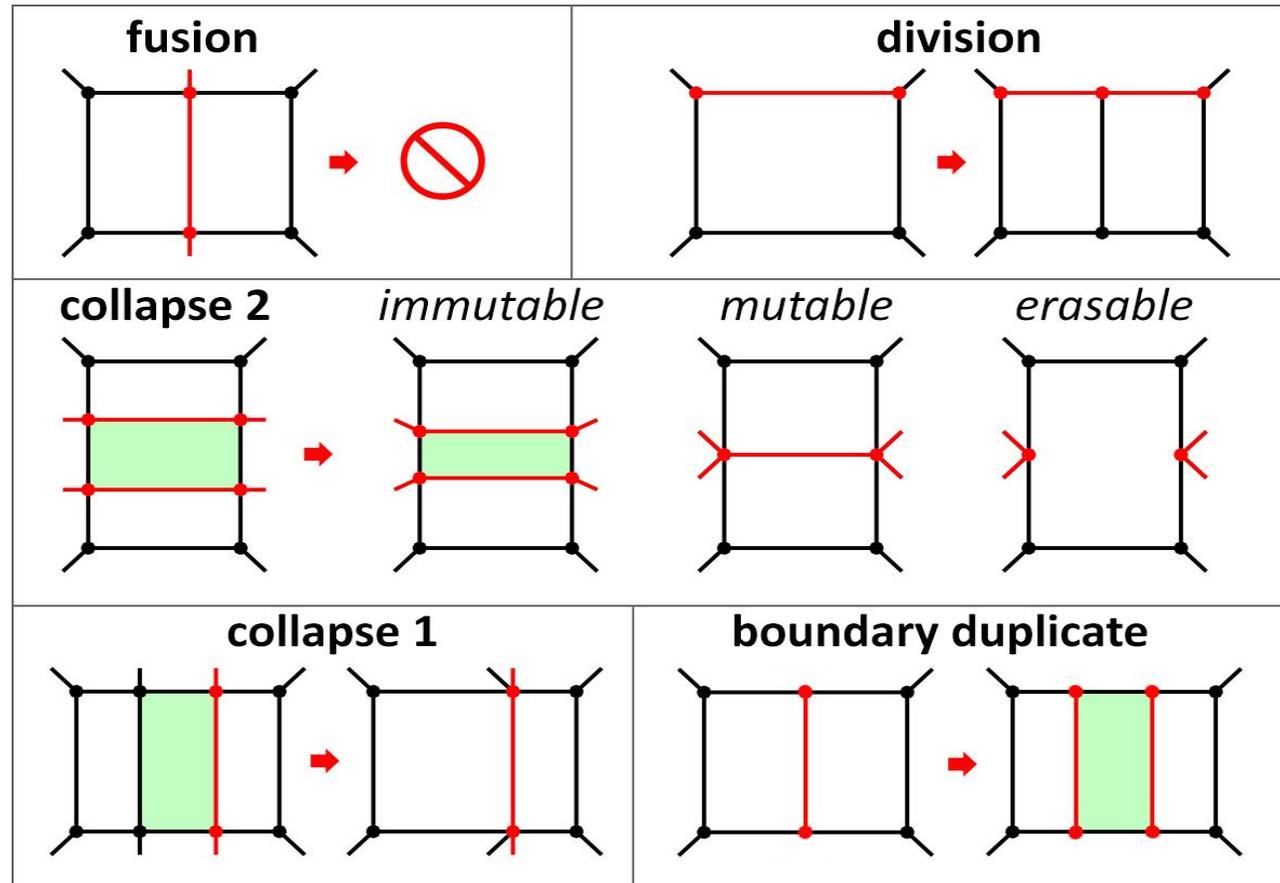
- Appliquer les déformations de l'espace
 - *4 opérations pour rétablir la qualité*
division/fusion disparition/duplication



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Formes portant des détails*

Complexes cellulaires imbriqués

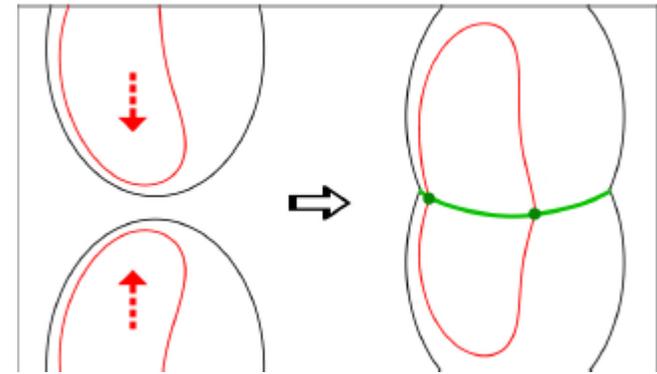
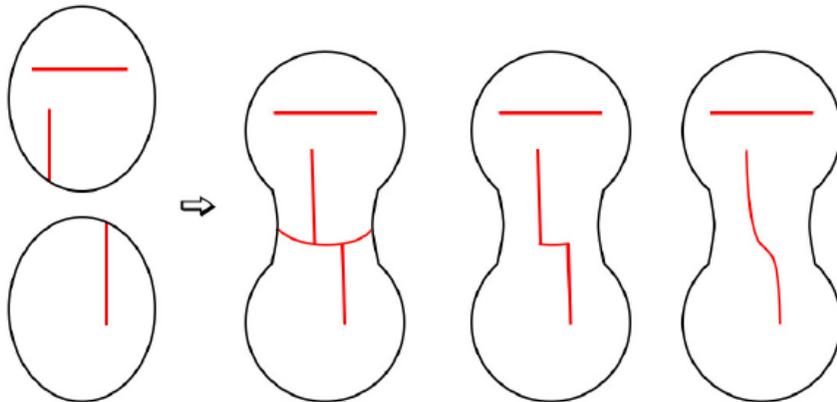
Appliquées
avec priorité
aux détails!



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Formes portant des détails*

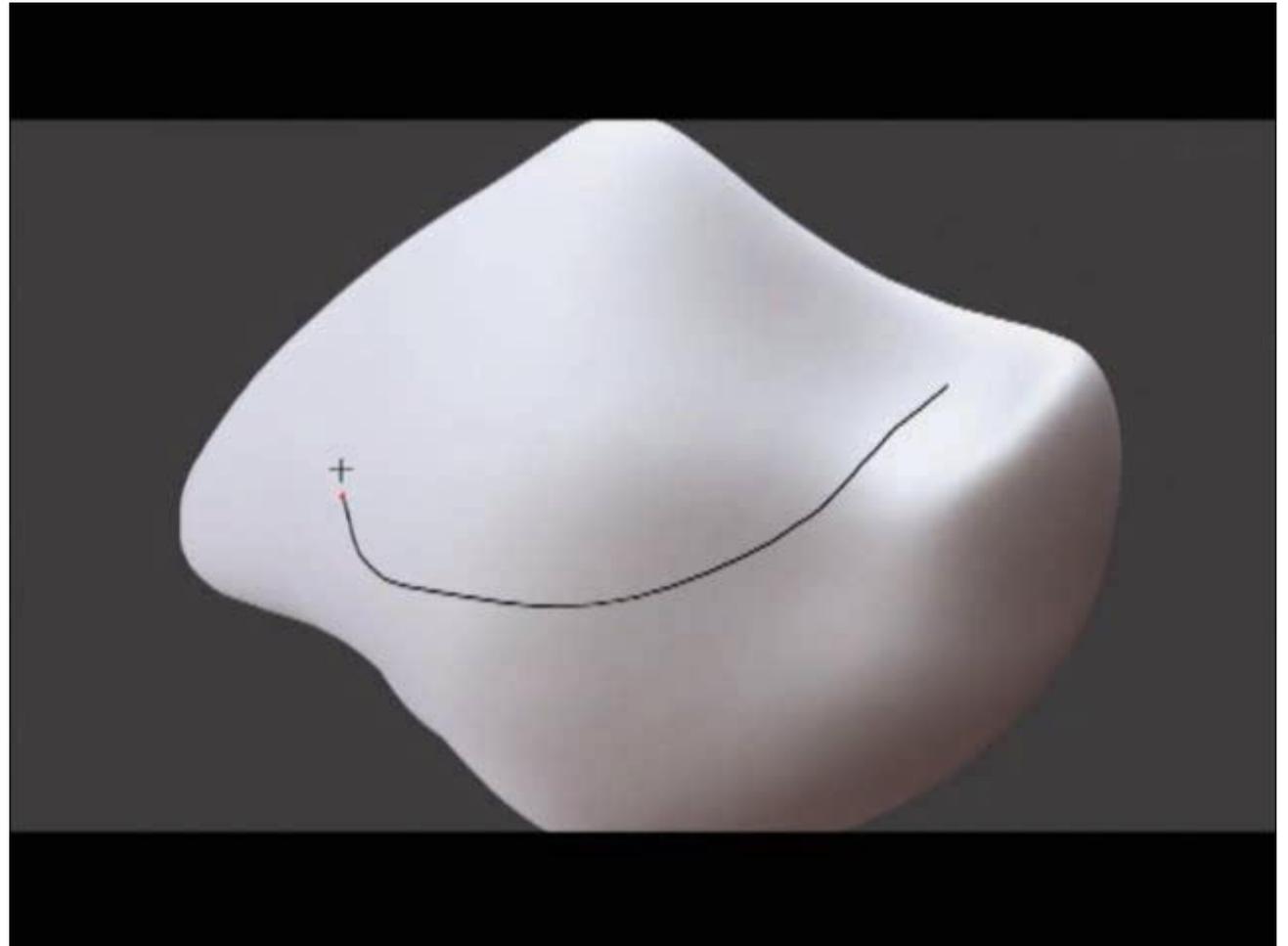
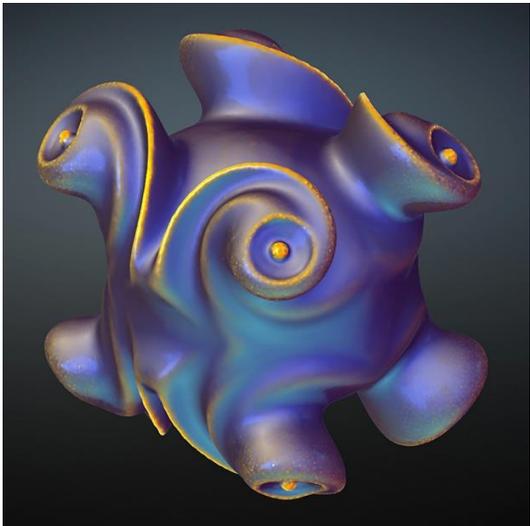
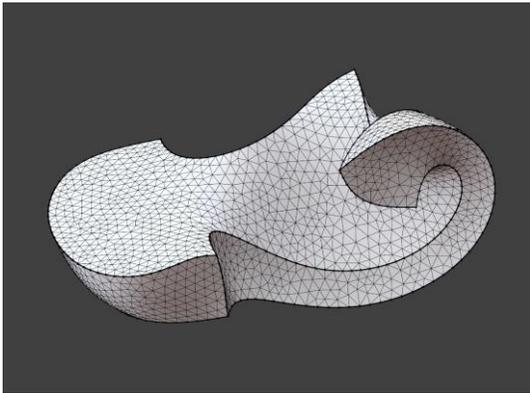
Lors de chaque déformation

- 1. Par dimensions croissantes :** Rétablir la qualité géométrique
 - Détails ni perdus ni floutés
- 2. Par dimensions décroissantes :** Traiter les auto-intersections
 - Fusion des cellules de dim $n \rightarrow$ fusion de dim $n-1$



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Formes portant des détails*

Résultats [Stanculescu 2013]



- ✓ *Argile virtuelle*
- ✓ *Déformations de l'espace*
 - *Formes portant des détails*

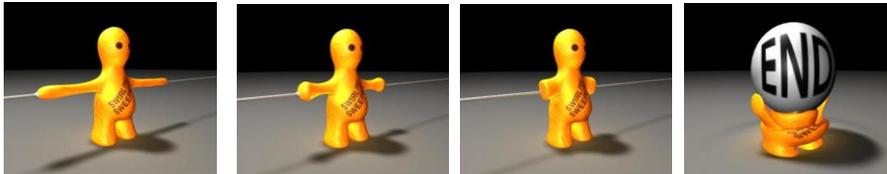
Résultats



Conclusion

Sculpture virtuelle pour créer des modèles 3D

- Importance de l'interaction par gestes
- Préférer l'expressif au réaliste
 - Lois simples pour des déformations naturelles



- Champ d'application plus large que dans le monde réel

Création d'objets destinés à être fabriqués

Séminaire de **Sylvain Lefebvre**

Équilibrage et supports de géométries pour l'impression des modèles 3D

Bibliographie

- Galyean & Hughes (1991). Sculpting : An interactive volumetric modeling technique. In Computer Graphics vol 25 (SIGGRAPH 91).
- Ferley, Cani, Gascuel (2001). Resolution Adaptive Volume Sculpting. Graphical Models (63).
- Dewaele & Cani (2004). Interactive global and Local Deformations for Virtual Clay, Graphical Models, Elsevier Science (66).
- Kry, Pihuit, Bernhardt, Cani. (2008) Hand-navigator: Hands-on interaction for Desktop Virtual Reality. 15th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technologies (VRST),
- Chardonnet & Leon (2012) Designing interaction in virtual worlds through a passive haptic peripheral. RO-MAN, 2012 IEEE, 284-289
- Angelidis, Wyvill, Cani (2004) Sweepers : Swept user-defined tools for modeling by deformation. Shape Modelling International'2004.
- Angelidis, Cani, Wyvill, King (2004). Swirling Sweepers: Constant volume modelling. Pacific Graphics'2004.
- Stanculescu, Chaine, Cani (2011). Freestyle : Sculpting meshes with self-adaptive topology, computers & Graphics, Elsevier, 35 (3), (Shape Modeling International).
- Stanculescu, Chaine, Cani, Singh (2013). Sculpting multi-dimensional nested structures, Computers & Graphics, Elsevier, 37 (6), (Shape Modeling International).