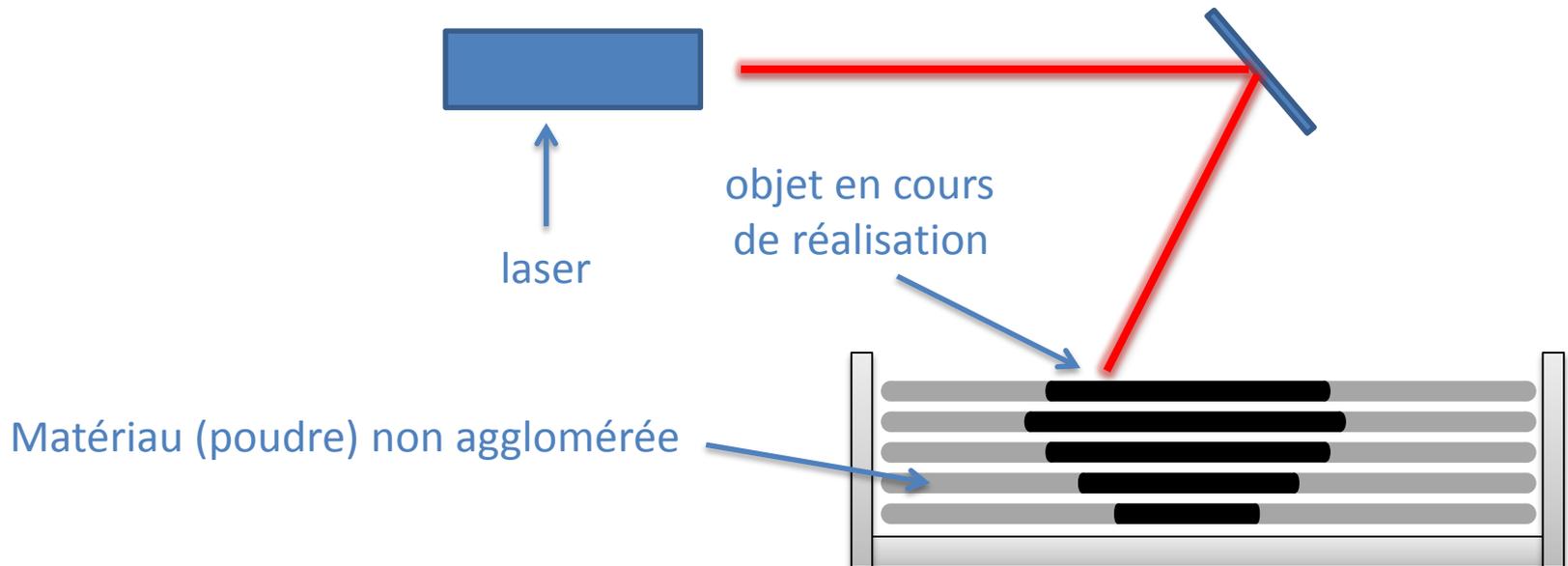


Modélisation pour la fabrication additive

Sylvain Lefebvre

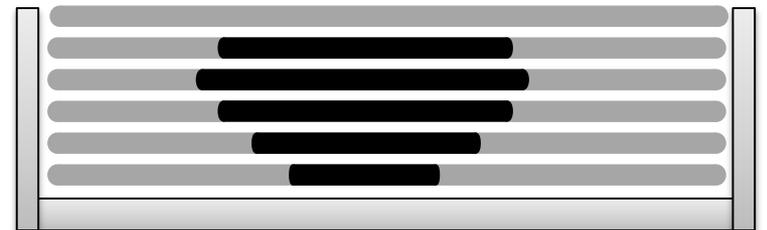
Fabrication additive

- Procède par *ajout* de matière
- Typiquement couche après couche
- Nombreuses technologies
- Exemple: SLS



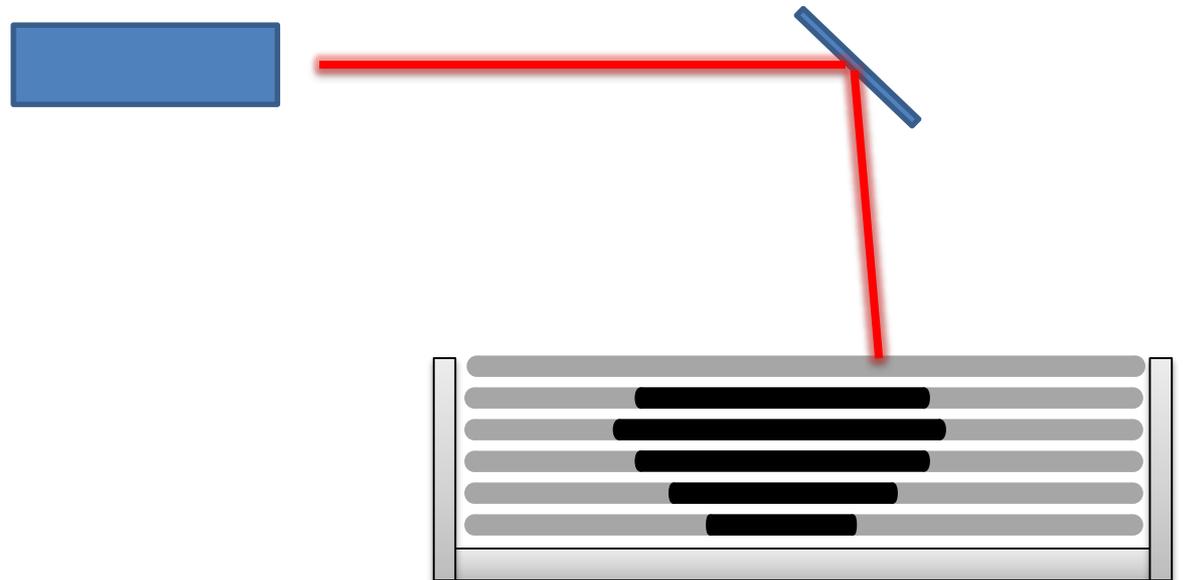
Fabrication additive

- Procède par *ajout* de matière
- Typiquement couche après couche
- Nombreuses technologies
- Exemple: SLS



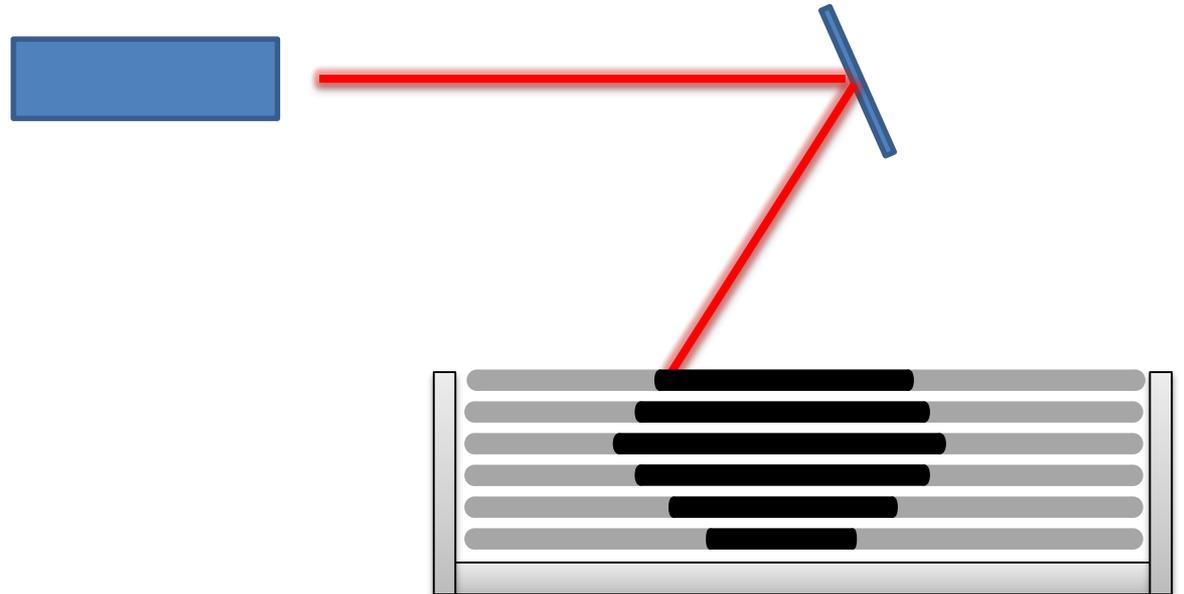
Fabrication additive

- Procède par *ajout* de matière
- Typiquement couche après couche
- Nombreuses technologies
- Exemple: SLS



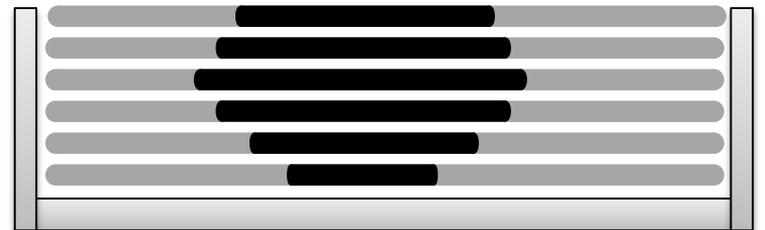
Fabrication additive

- Procède par *ajout* de matière
- Typiquement couche après couche
- Nombreuses technologies
- Exemple: SLS



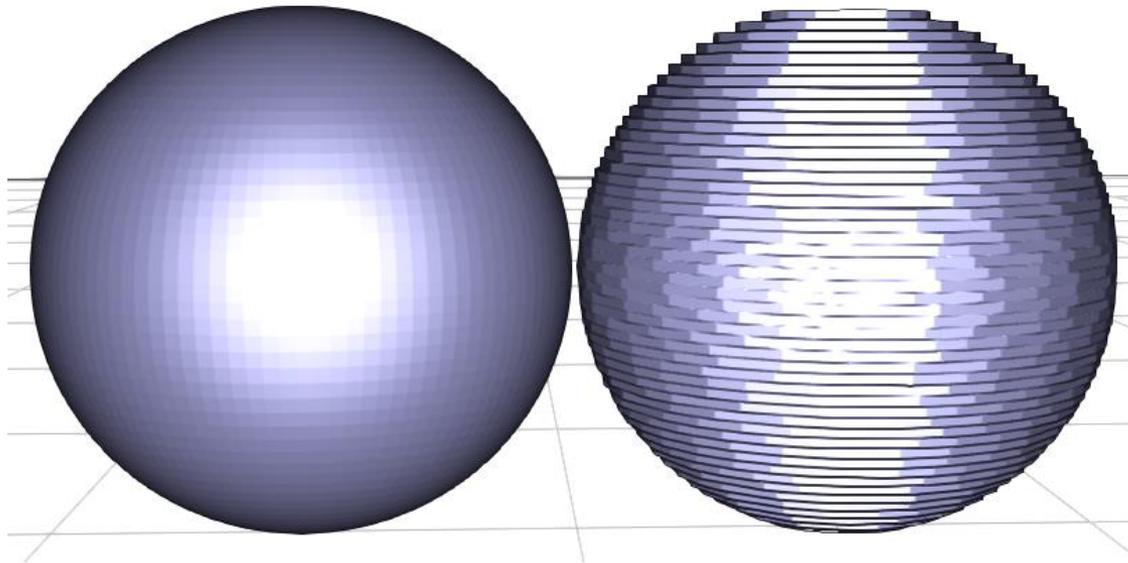
Fabrication additive

- Procède par *ajout* de matière
- Typiquement couche après couche
- Nombreuses technologies
- Exemple: SLS

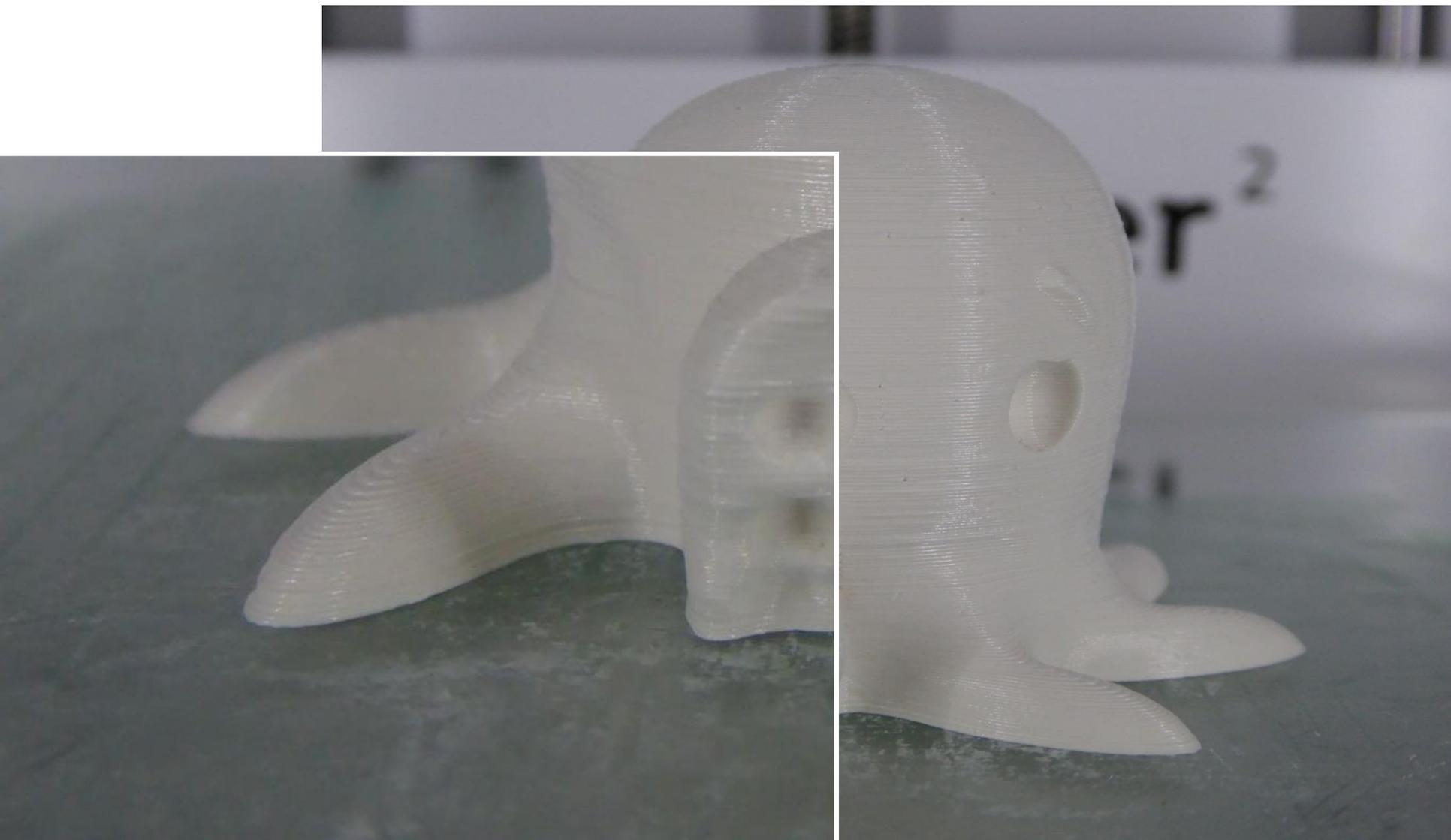


Tranchage

- Séparation du modèle numérique en couches



Exemple de pièce



Fabrication additive

- Fabrication directe depuis un modèle virtuel
 - Pas d'étape intermédiaire
 - Cycle de production raccourci
- Plus de frontière entre virtuel et réel:
Tout objet virtuel est potentiellement fabricable ()*

Fabrication additive

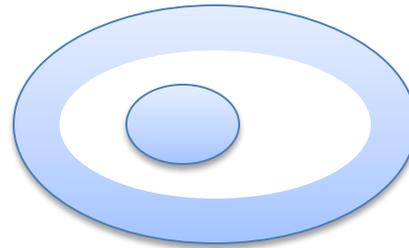
- Fabrication directe depuis un modèle virtuel
 - Pas d'étape intermédiaire
 - Cycle de production raccourci
- Plus de frontière entre virtuel et réel:
Tout objet virtuel est potentiellement fabricable ()*

(*) Prise en charge *automatique* des contraintes structurelles et de fabrication?

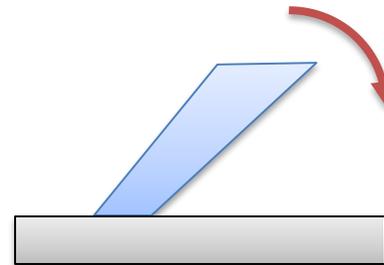
Contraintes structurelles

- Quelques exemples:

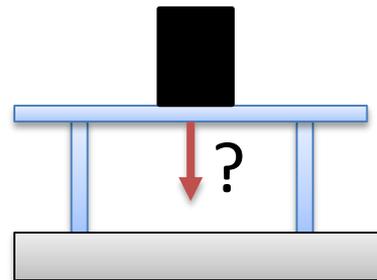
- Topologie



- Equilibre



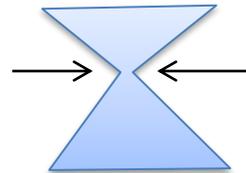
- Rigidité



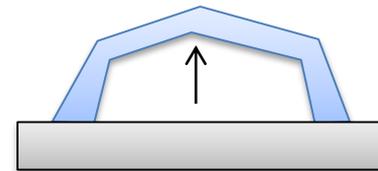
Contraintes de fabrication

- Selon les procédés:

- Epaisseur minimale



- Existence de surplombs



- Déformations (tassements, dilatations)

Plan

- Equilibrage d'objets personnalisés

Make it stand

R. Prévost, E. Whiting, S. Lefebvre, O. Sorkine

Transactions on Graphics 2013

- Equilibrage pour la fabrication

Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing

J. Dumas, J. Hergel, S. Lefebvre

Transactions on Graphics 2014

Plan

- Equilibrage d'objets personnalisés

Make it stand

R. Prévost, E. Whiting, S. Lefebvre, O. Sorkine

Transactions on Graphics 2013

- Equilibrage pour la fabrication

Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing

J. Dumas, J. Hergel, S. Lefebvre

Transactions on Graphics 2015

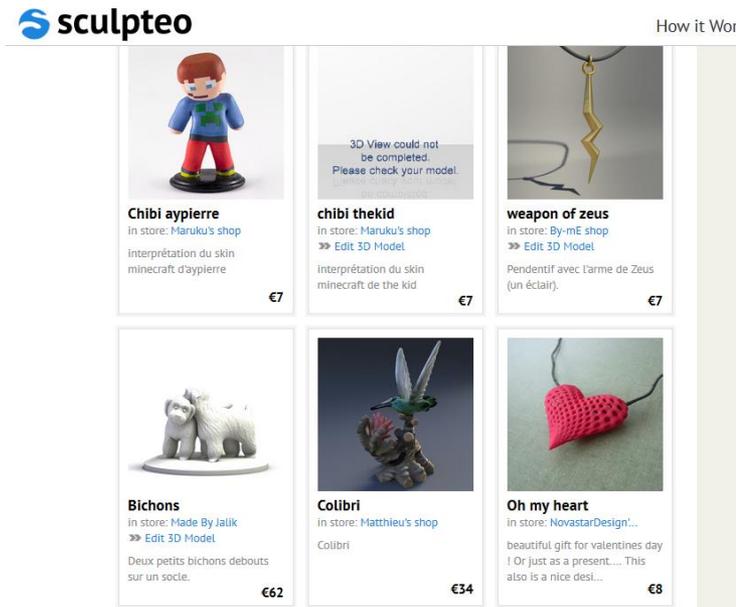
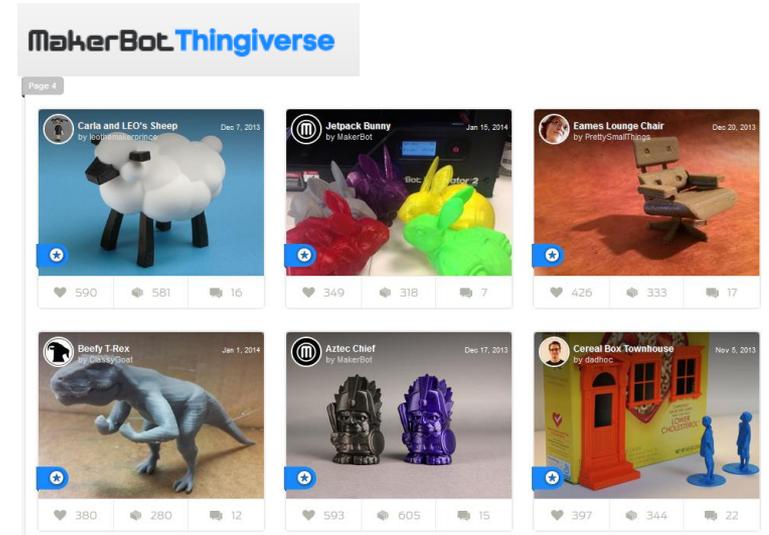
Personnalisation de masse

- Permettre à tous la personnalisation d'objets


En particulier non experts.
- Idée principale:
 - L'utilisateur choisi parmi une base d'objets.
 - Il adapte l'objet.
 - L'objet est directement fabriqué par fabrication additive.

Nombreux sites dédiés

- Thingiverse
- Sculpteo
- Shapeways
- Ponoko
- etc.

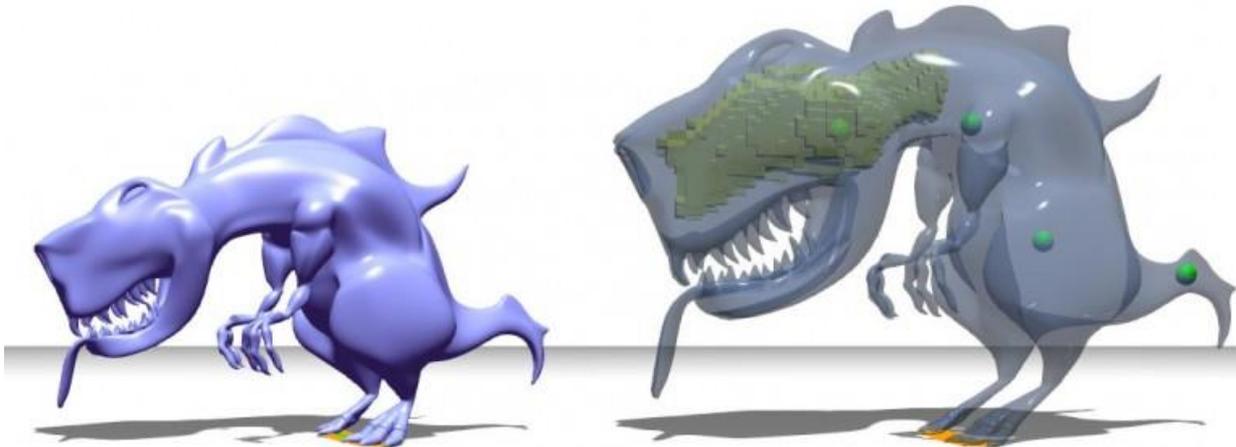


Notre approche

– L'utilisateur *déforme* l'objet.



– L'algorithme *coopère* pour équilibrer l'objet

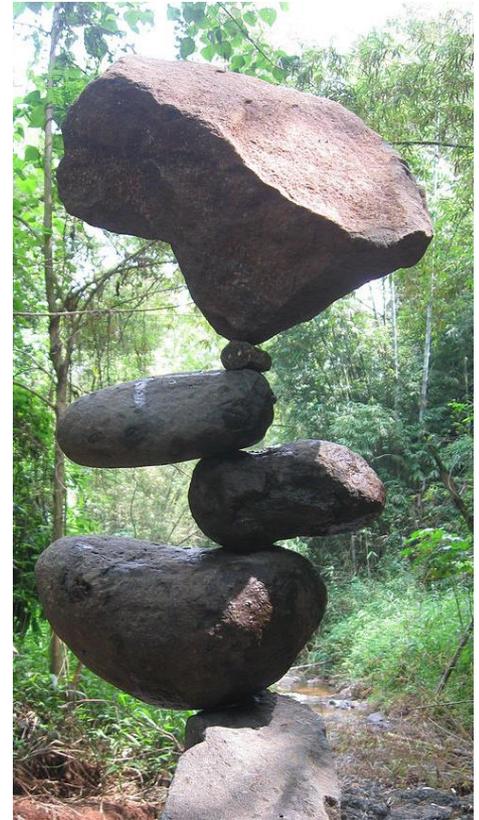


Équilibrage

- Important en design et en art
 - Equilibre asymétrique



Oblique by Brett Swope



by Leandro Inocencio

- Important en ingénierie mécanique/robotique
 - Équilibrage de parties fixes ou mobiles

Equilibrage

- Propriété très difficile à juger.
 - Dans la réalité
(sculpture: piédestal)
 - Dans les outils virtuels
(aucune indication de la 'masse', pas de retour physique).

Définitions

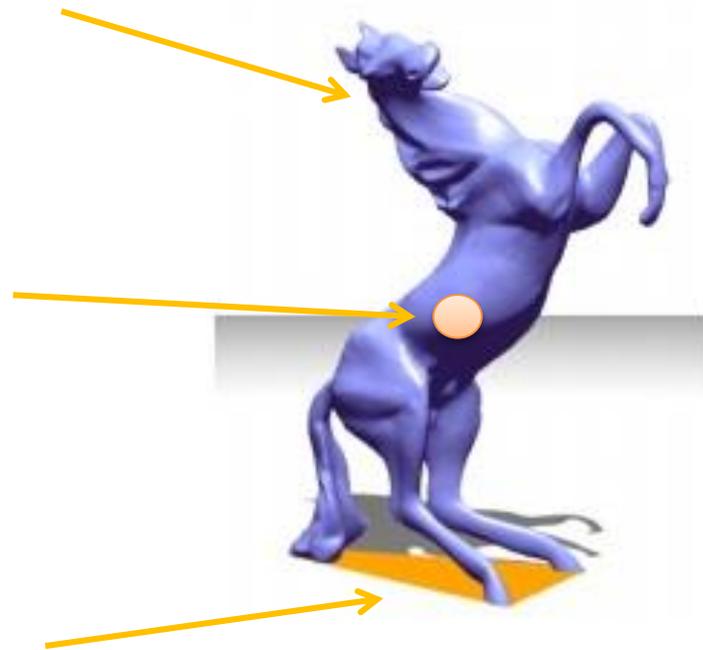
- Solide *indéformable homogène* S
 - Masse volumique ρ

- Centre de masse $c(S)$

$$c(S) = \frac{\rho \int_S r \, dr}{\rho \int_S dr}$$

- Base de support $B(S)$

- Enveloppe convexe des points de contact



Equilibre *statique*

- Condition nécessaire et suffisante :
(plan support orthogonal à la gravité)

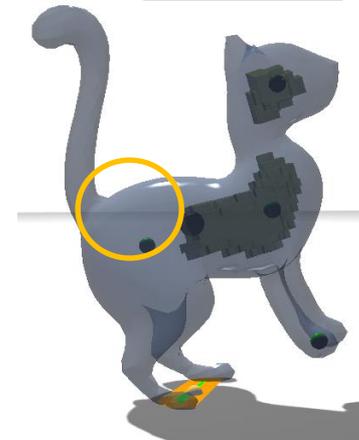
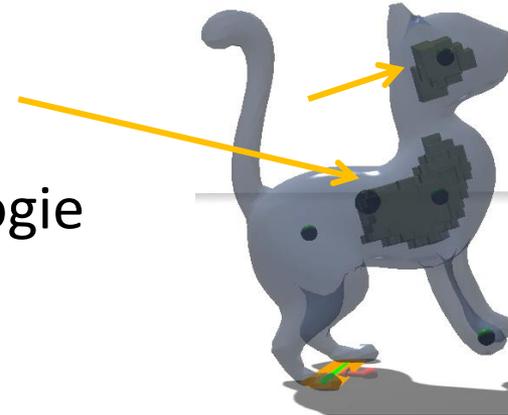
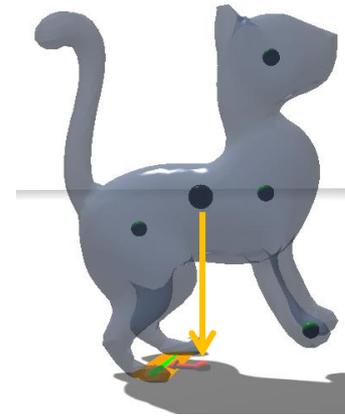
Soit c^* le centre de masse projeté sur le plan support, le solide S est en équilibre statique ssi

$$c^* \in B(S)$$



Intuition

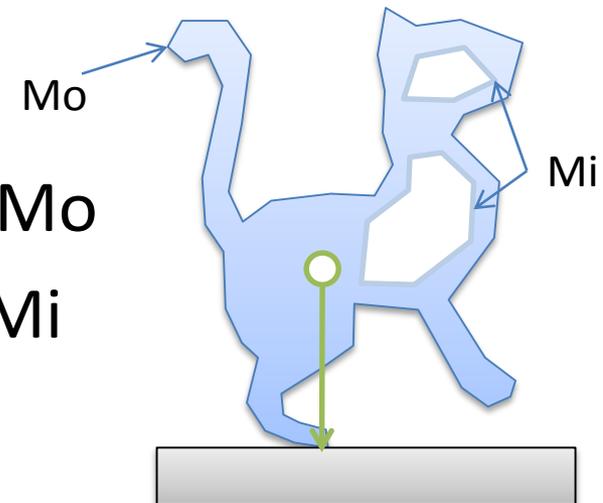
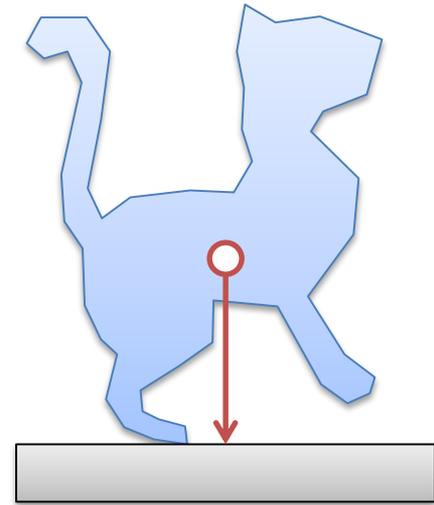
- Deux méthodes:
 - 1) Creuser l'objet
 - Contraintes: épaisseur, topologie
 - 2) Déformer l'objet
 - Contrainte: préserver les détails



Interactivité

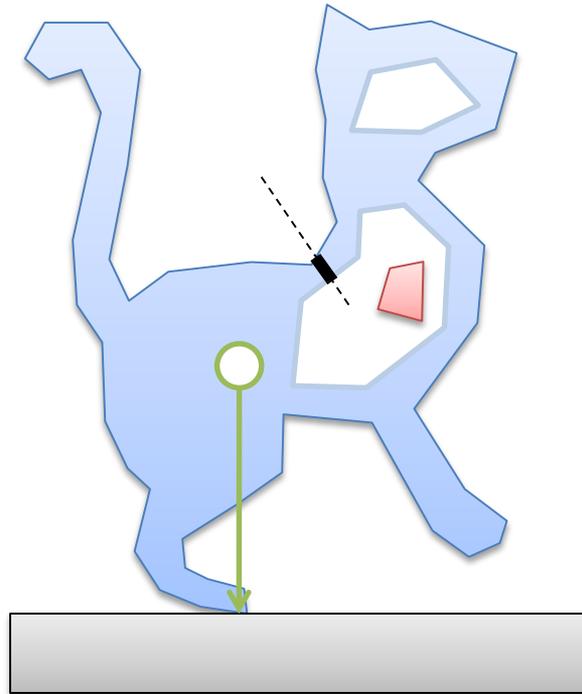
Formulation du problème

- Entrée:
 - Maillage triangulaire
 - 2-variété sans bord
 - Position souhaitée
- Sortie:
 - Maillage triangulaire externe M_o
 - Maillage triangulaire interne M_i
 - Equilibre statique



Contraintes

- Volume résultant $M_0 \setminus M_i$
 - Epaisseur minimale
 - Topologie



Formulation du problème

- Fonction objectif :

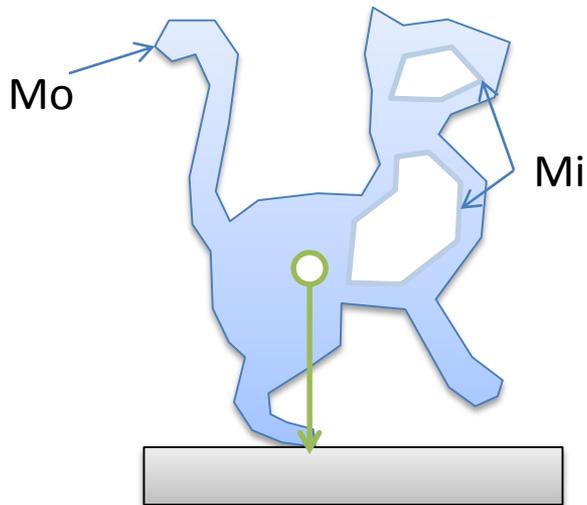
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



Equilibre?

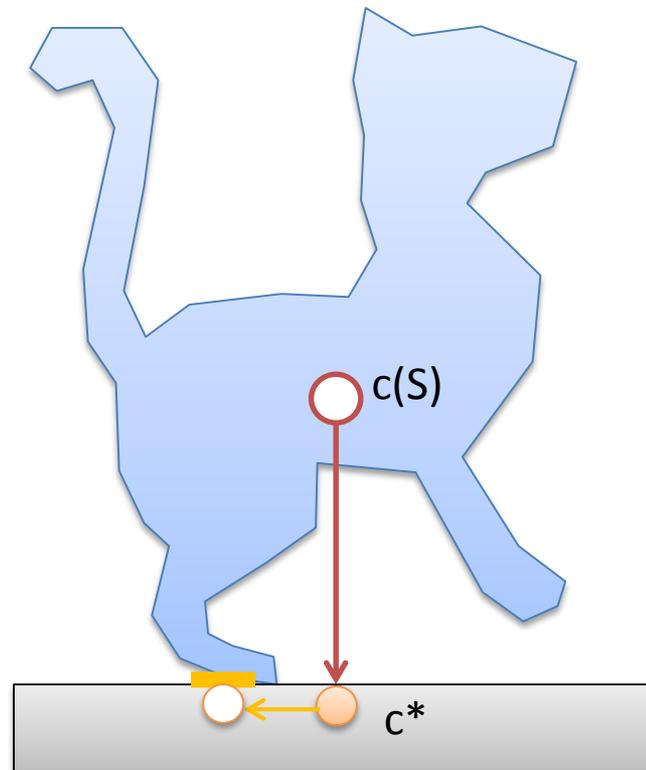


Apparence?



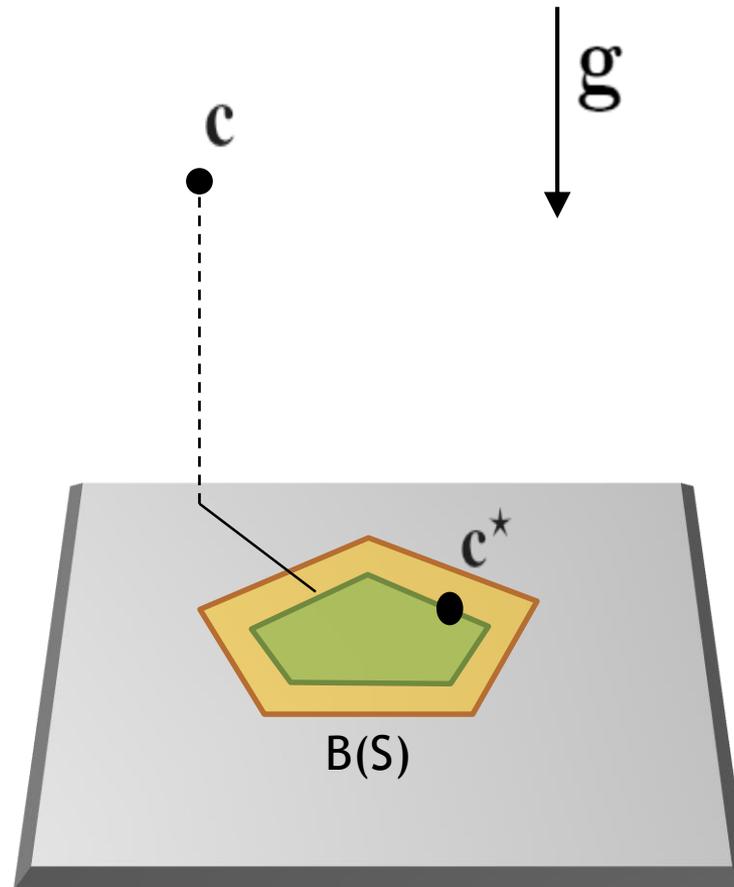
Equilibre

- Déplacer le centre de masse
- Cible: point dans $B(S)$



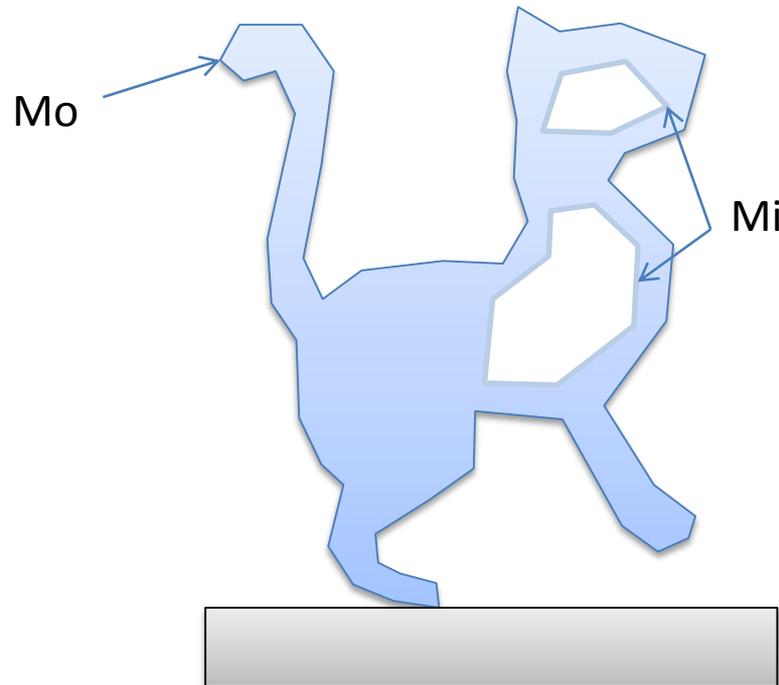
Equilibre et stabilité

- Deux notions différentes.



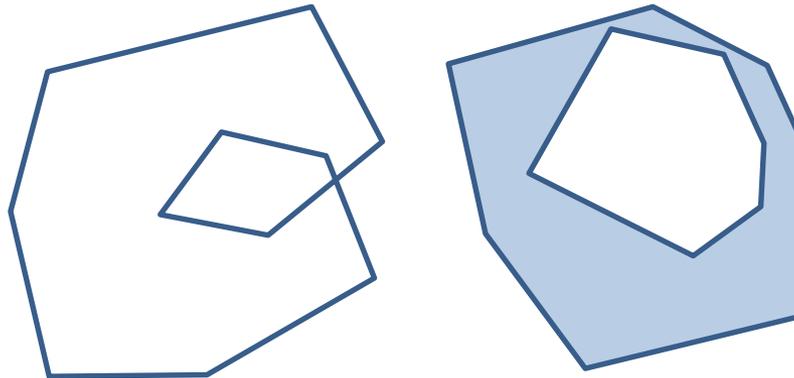
Représentations géométriques

- Mo: maillage triangulaire en entrée.
- Mi ?



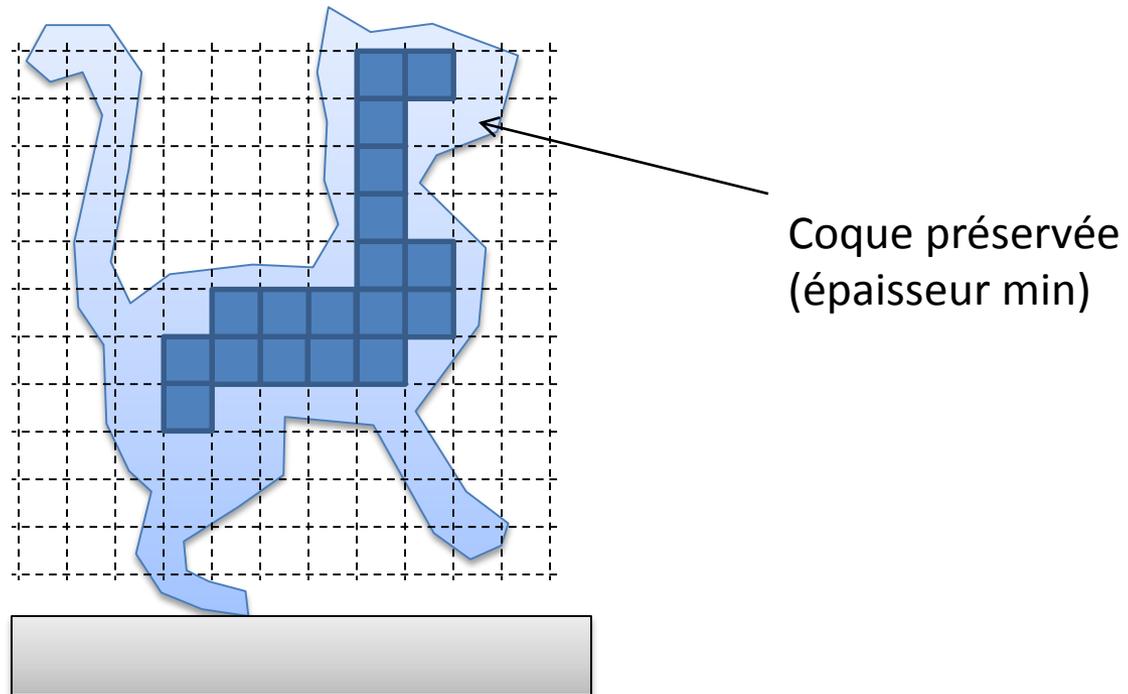
Représentation de Mi

- Maillage triangulaire?
 - Peu adapté: auto-intersections, épaisseur, ...
 - Exigerait une machinerie lourde.



Représentation de Mi

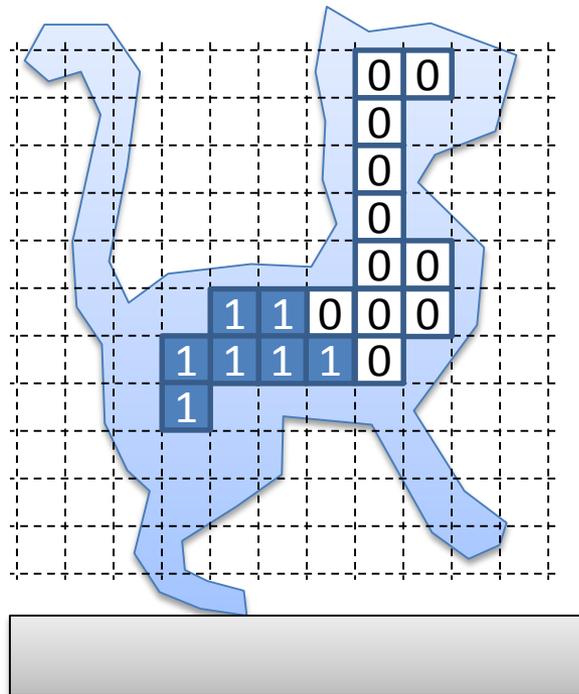
- ➔ Voxels (grille régulière volumique)
 - Décomposition en voxels très efficace (GPU).
 - Notions volumiques aisément capturées.



Problème combinatoire

Sélection binaire de chaque voxel.

Mi = bord de l'union des voxels '0'



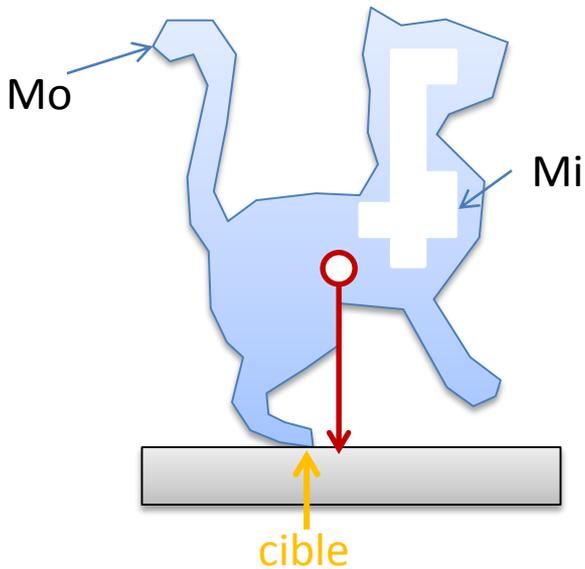
Optimisation

- Fonction objectif:

$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$

Combinatoire

Continue



Optimisation

- Deux phases:
 - Améliorer M_i étant donné M_o [combinatoire]
 - Améliorer M_o étant donné M_i [continue]

(descente de coordonnées par blocs)

Optimisation

- Deux phases:

- Améliorer M_i étant donné M_o [combinatoire]

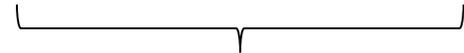
- Améliorer M_o étant donné M_i [continue]

(descente de coordonnées par blocs)

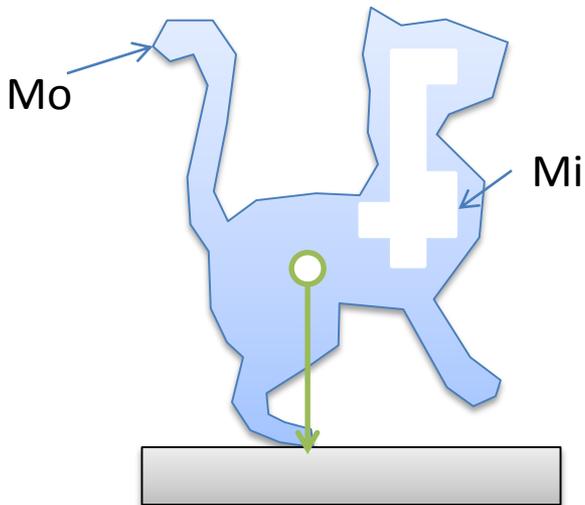
Améliorer Mi

- Fonction objectif:

$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



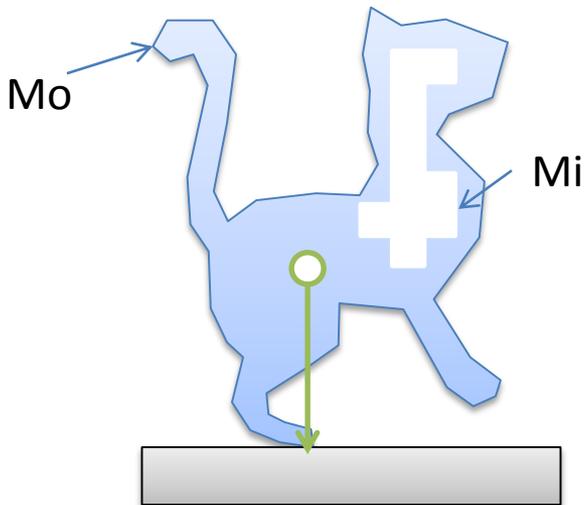
Mi n'a pas d'influence



Améliorer Mi

- Fonction objectif:

$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \underbrace{\mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)}_{\text{Mi n'a pas d'influence}}$$

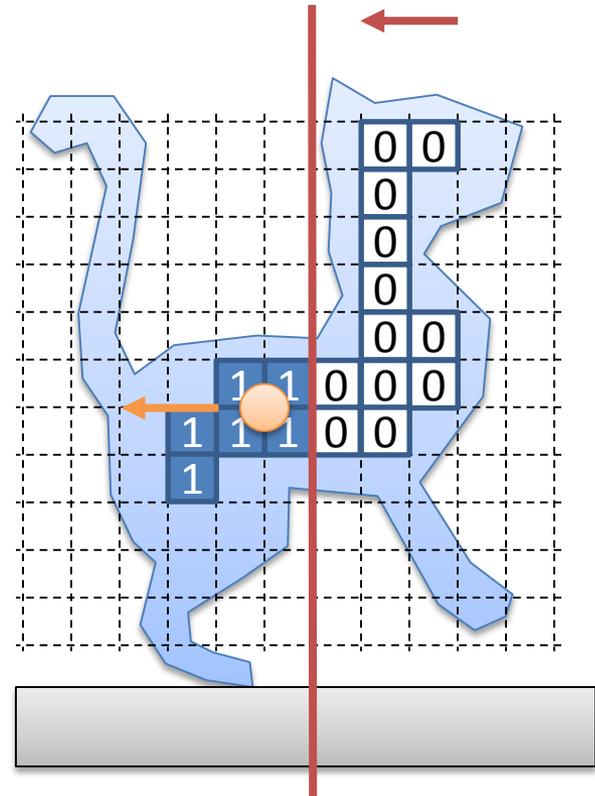


Améliorer Mi

- Déplacer le centre de masse.
 - Calcul aisé à partir des voxels.
 - Problème d'assignement binaire.
- ➔ Méthode à pénalité?
 - Binaire ➔ continue non linéaire ($0 < v < 1$, v^3)
 - Couteux à résoudre
- ➔ Heuristique

Heuristique

- Contraint la forme de la solution:
 - Sélectionner les voxels avec un plan séparateur
 - Plan vertical
- Très rapide
- Topologie
- Limité (stabilité)



Optimisation

- Deux phases:

- Améliorer M_i étant donné M_o [combinatoire]

- Améliorer M_o étant donné M_i [continue]

Optimisation

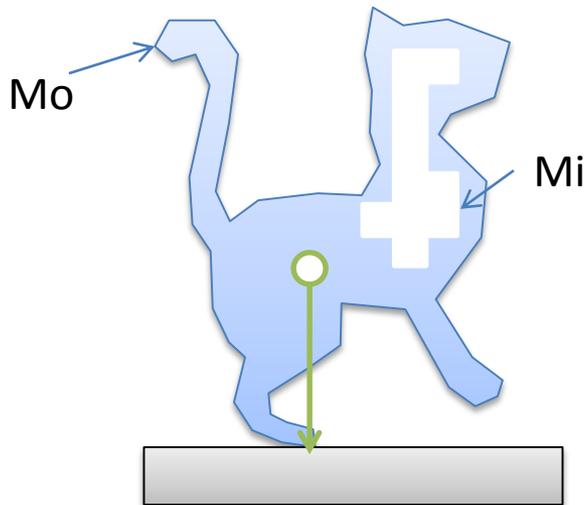
- Deux phases:
 - Améliorer M_i étant donné M_o [combinatoire]
 - Améliorer M_o étant donné M_i [continue]

Améliorer Mo

- Fonction objectif:

$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) \underbrace{E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)}$$

Mo influence les deux termes



Quantités continues: descente de gradient

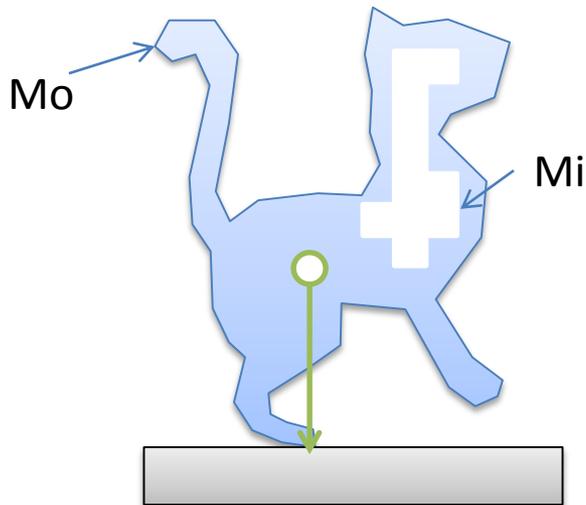
Variables: sommets de Mo

Améliorer Mo

- Fonction objectif:

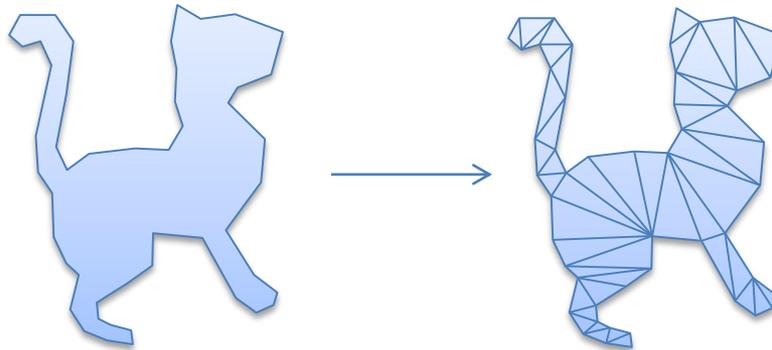
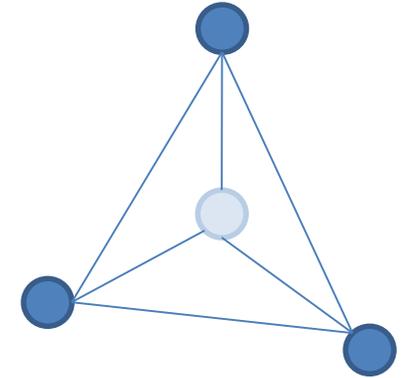
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) \underbrace{E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O)}_{\text{Mo influence les deux termes}} + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$

Mo influence les deux termes



Mo: centre de masse

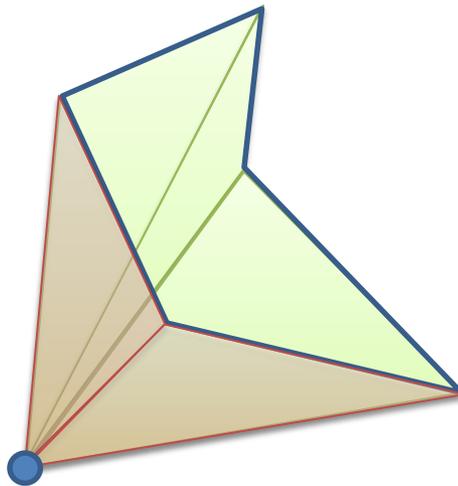
- Calcul du centre de masse
 - Quantité volumique
 - Tétraèdres?



➔ Génération robuste de tétraèdres coûteuse.

M_0 : centre de masse

- Contour fermé
 - Théorème de Green/Stokes.
 - Exemple: aire d'un contour polygonal 2D orienté:



Mo: centre de masse

- Contour fermé
 - Théorème de Green/Stokes!
 - Expression du centre de masse
directement *à partir des sommets de Mo*

Objectif: centre de masse

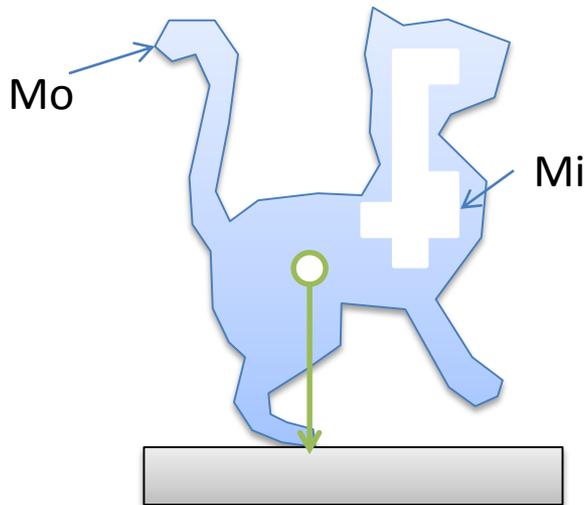
- $c(Mi, Mo) = \frac{c(Mo)V(Mo) - c(Mi)V(Mi)}{V(Mo) - V(Mi)}$
- $E_{CoM} = \|c^*(Mi, Mo) - c_{cible}\|^2$
 - Mi supposé fixe
 - Dérivable en fonction des sommets de Mo

Améliorer Mo

- Fonction objectif:

$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) \underbrace{E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O)}_{\text{Mo influence les deux termes}} + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$

Mo influence les deux termes

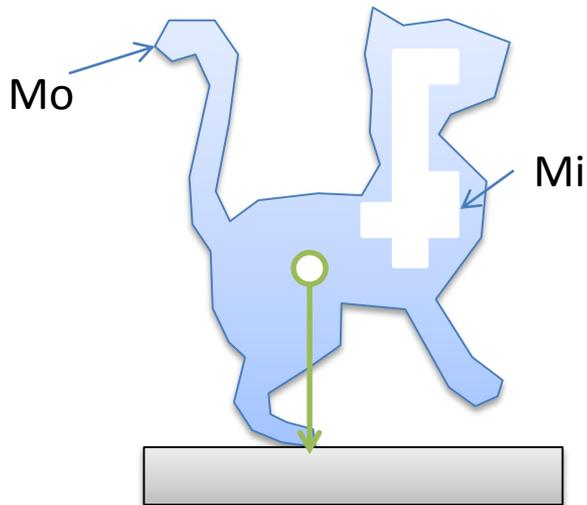


Améliorer Mo

- Fonction objectif:

$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$

Mo influence les deux termes



Mo: appearance

- Préservation des détails
pendant les déformations
- Basé sur des méthodes 'classiques'
 - Laplacian surface editing [Sorkine et al. 2004]

Mo: apparence

- Intuition, sur le cas 2D



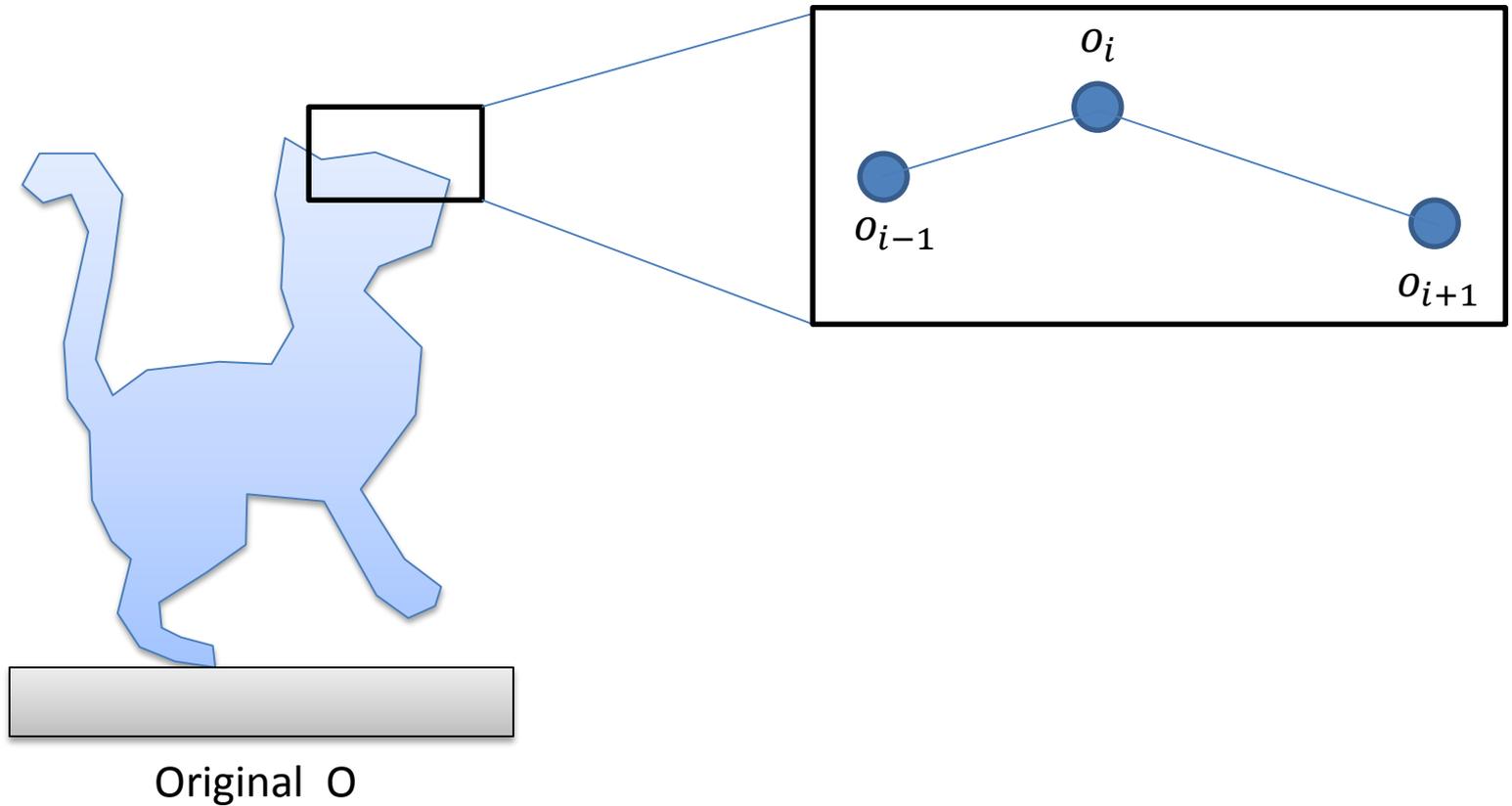
Original O

$E_M(M_o)?$

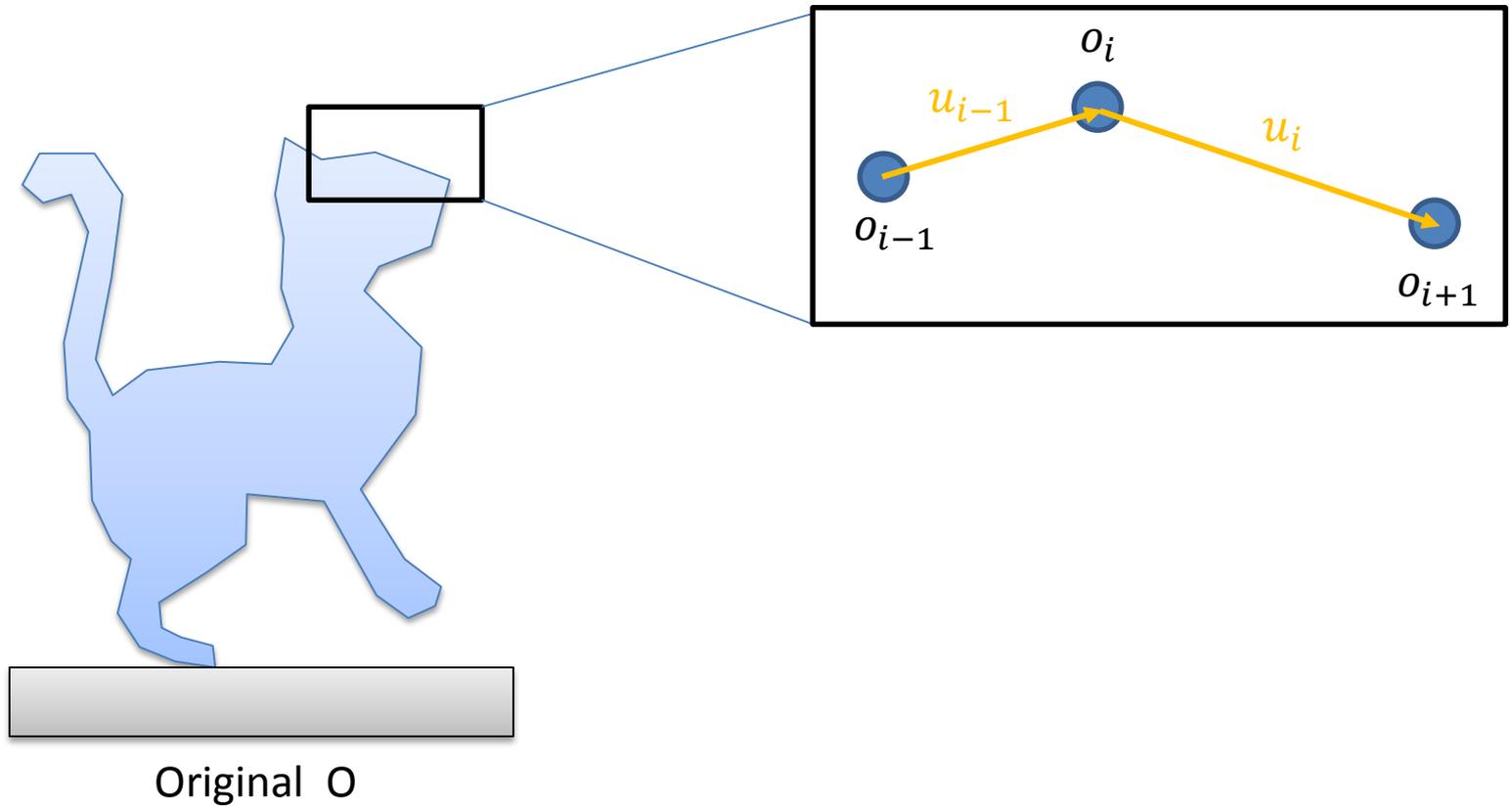


Déformé M_o

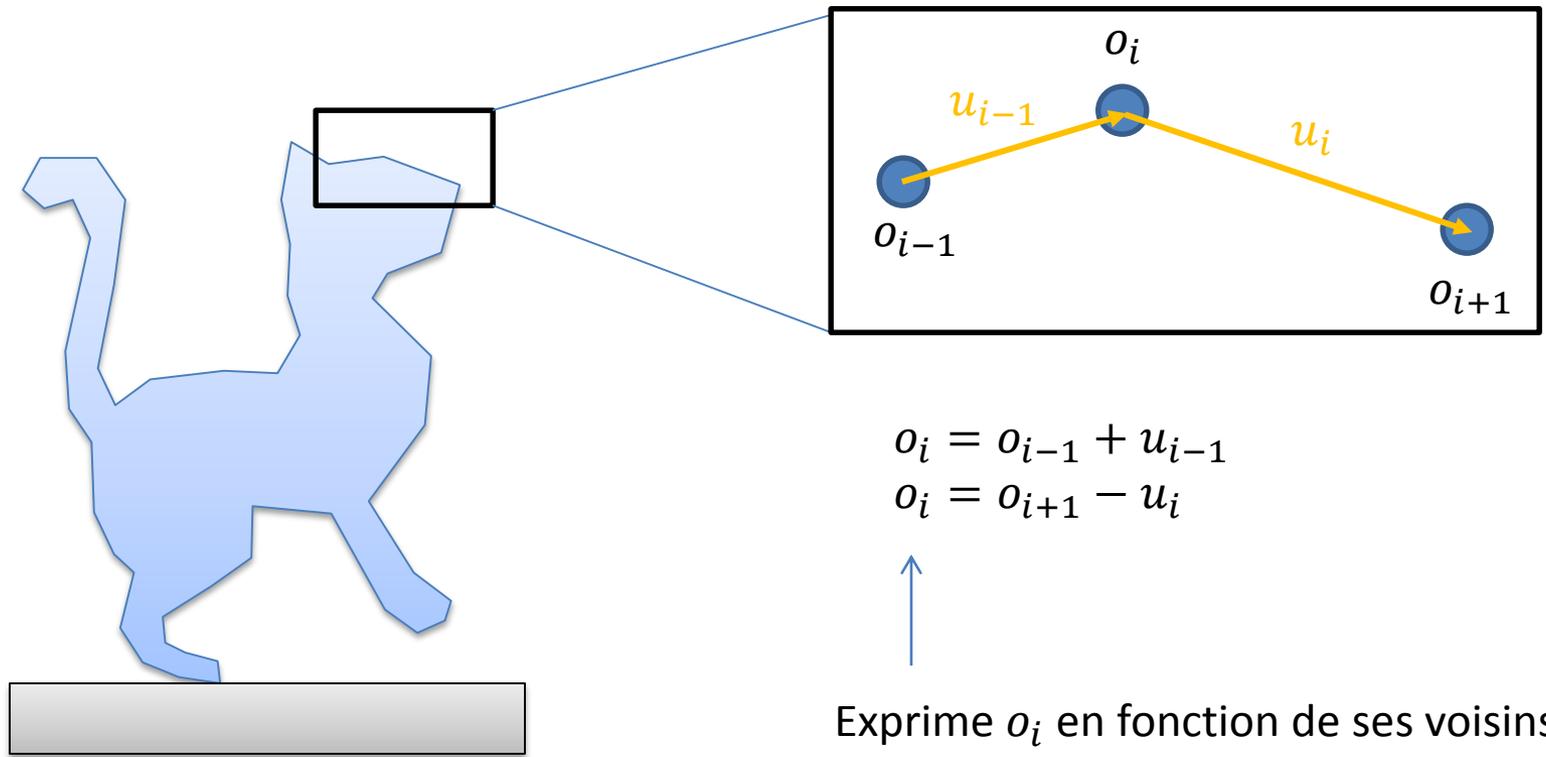
Appearance



Appearance



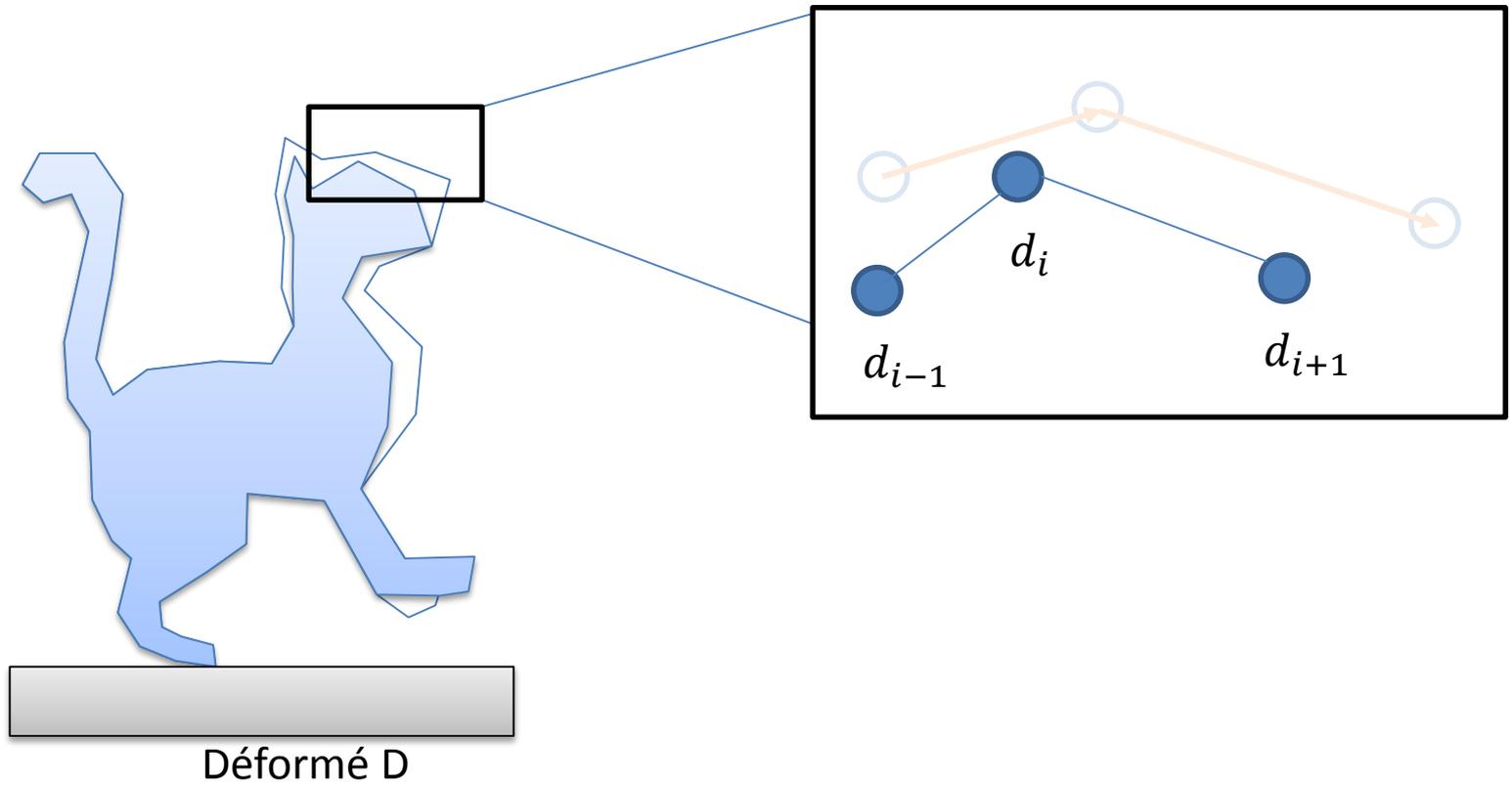
Apparence



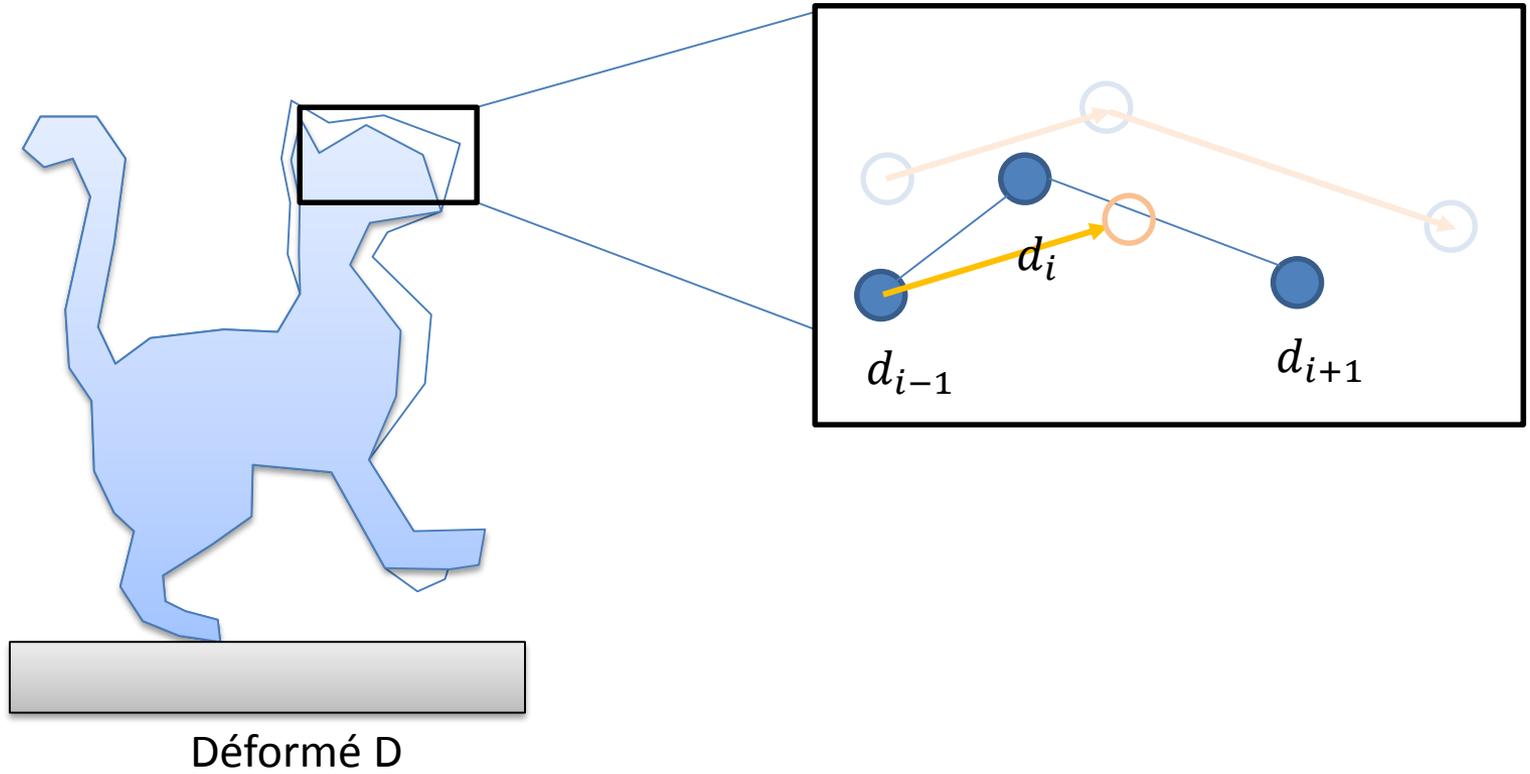
Original O

Exprime o_i en fonction de ses voisins.
 u_i, u_{i-1} définissent les *détails locaux*.

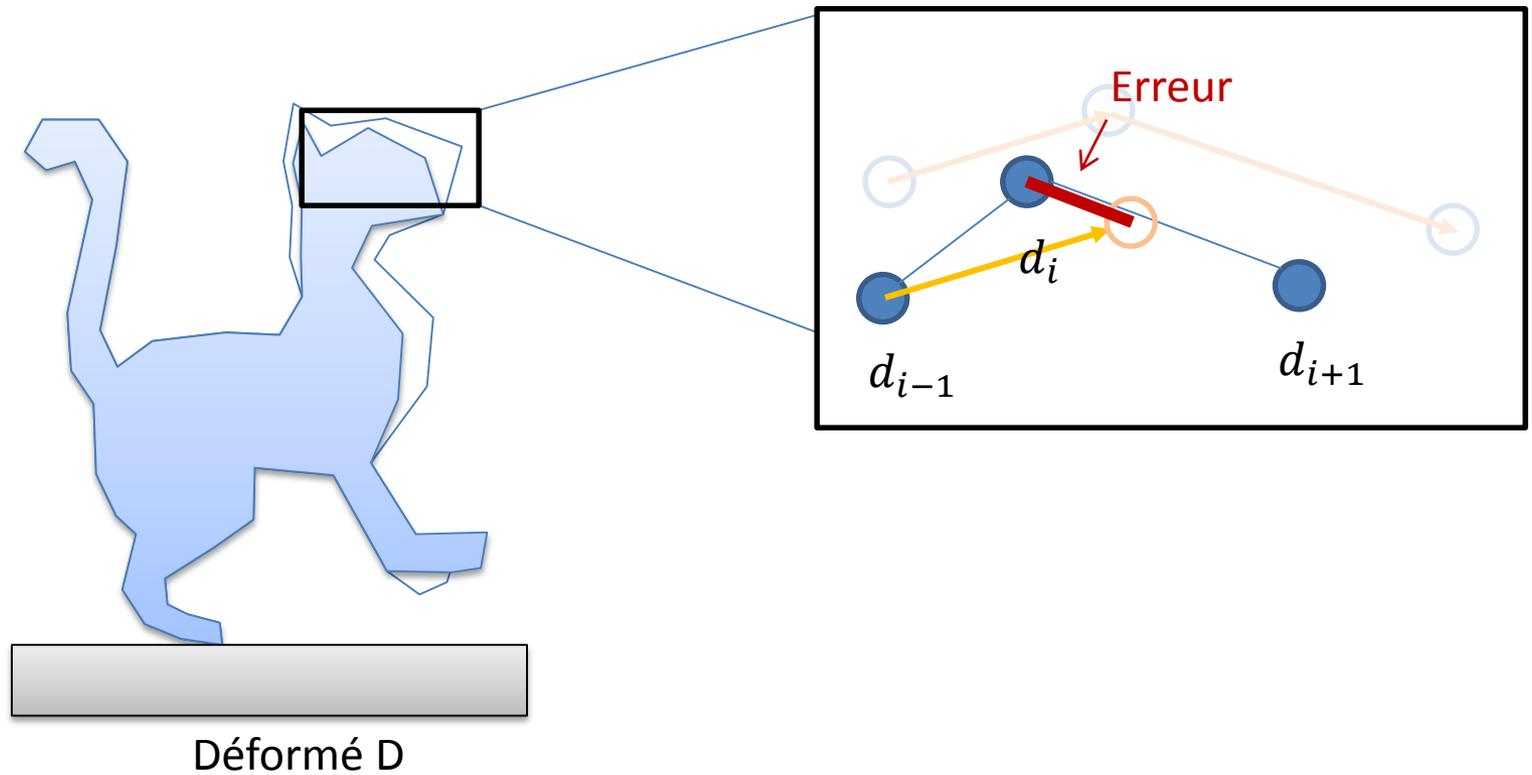
Apparence



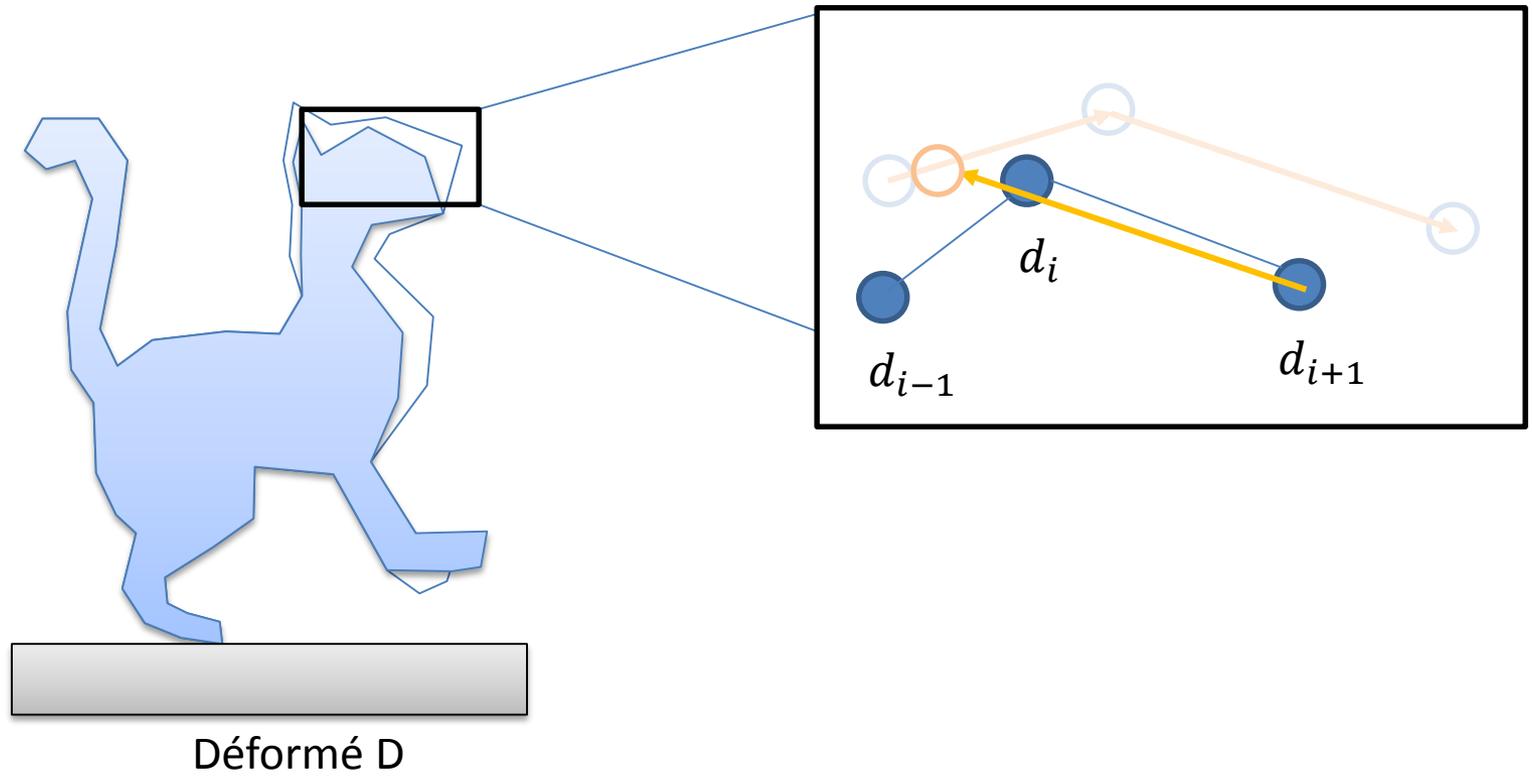
Apparence



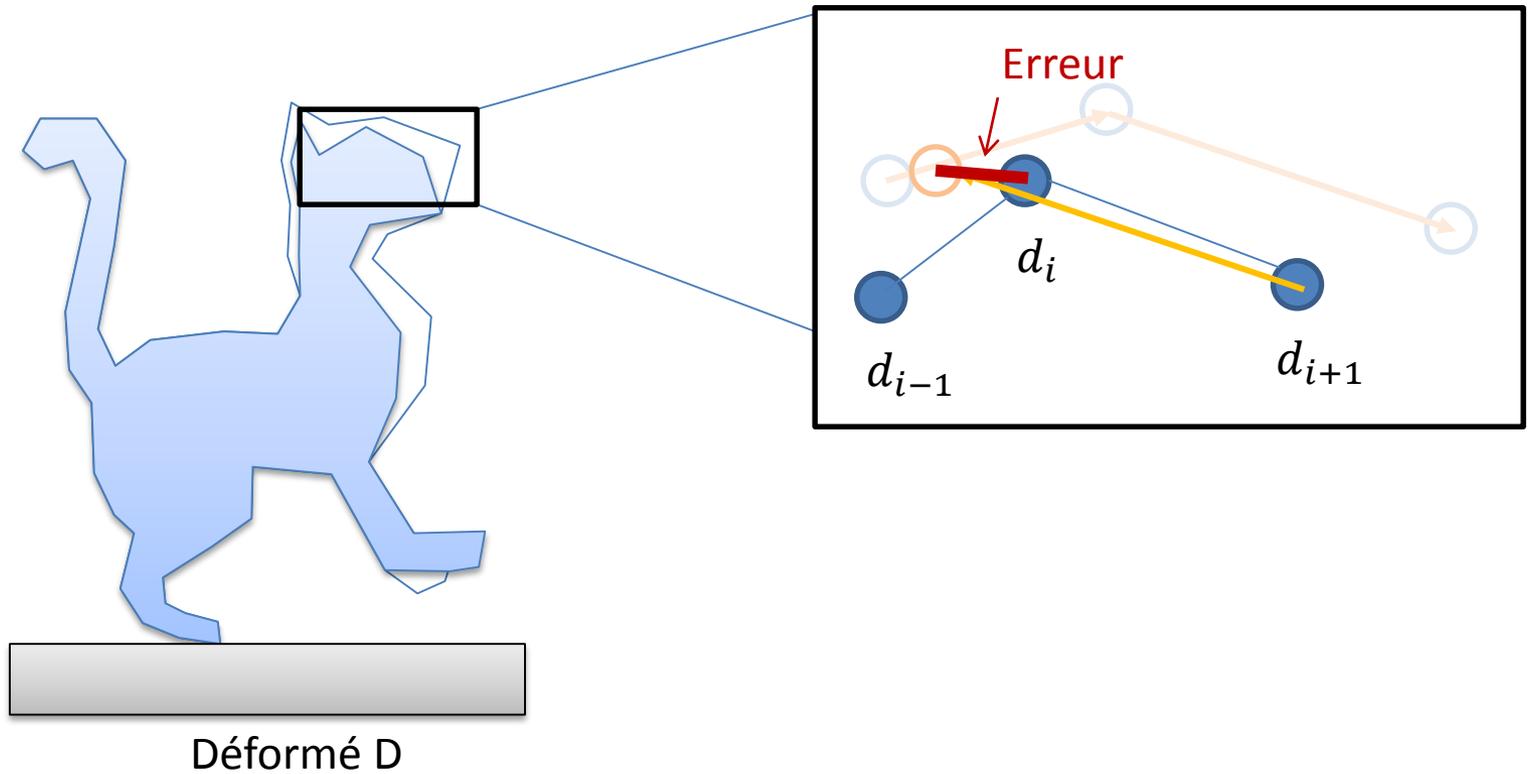
Apparence



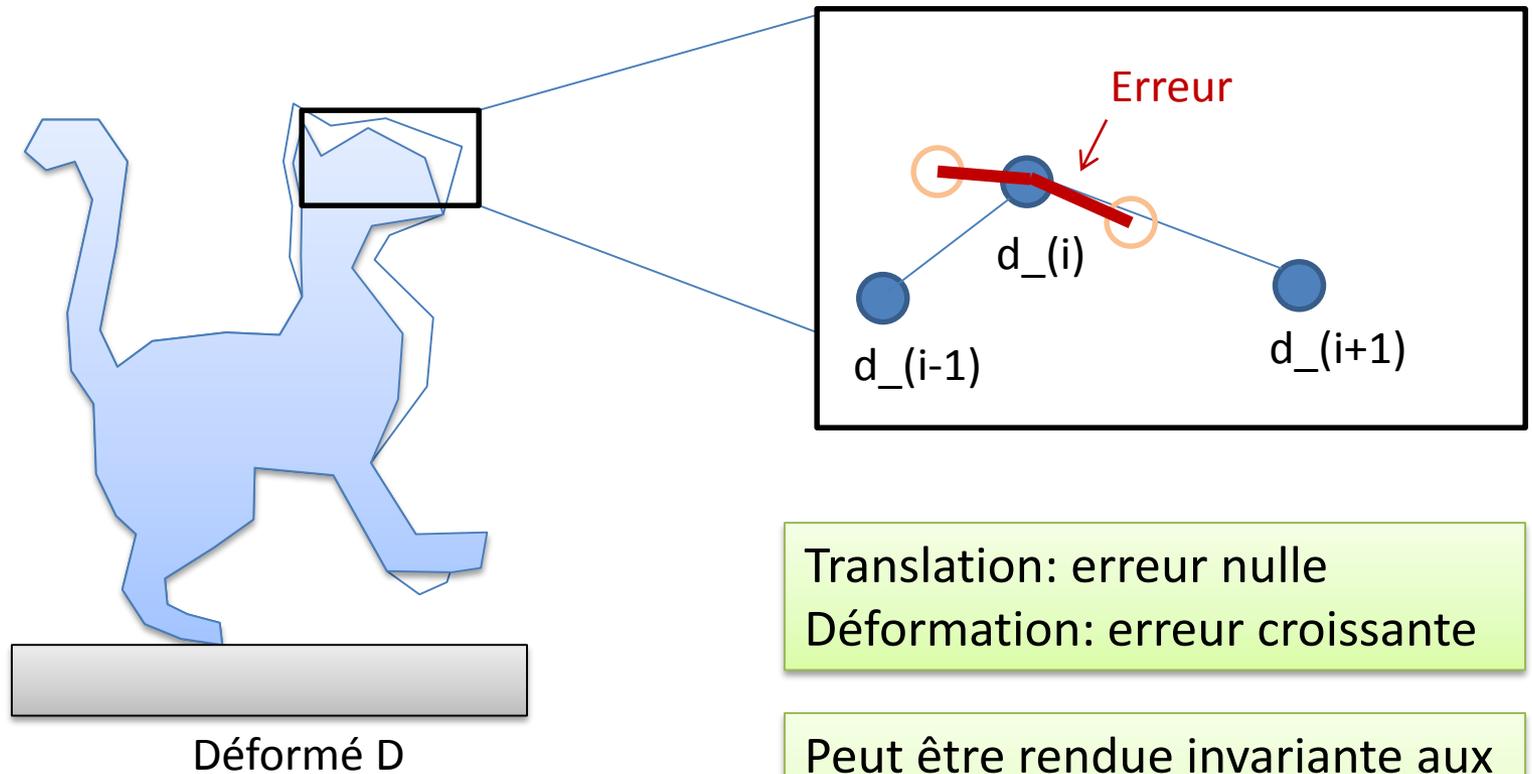
Apparence



Apparence



Apparence



Translation: erreur nulle
Déformation: erreur croissante

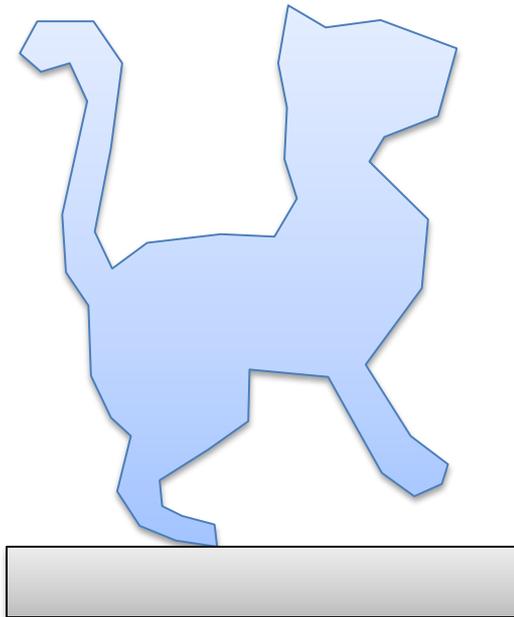
Peut être rendue invariante aux changements d'échelles et faibles rotations.

Mo: apparence

- 3D: même principe général

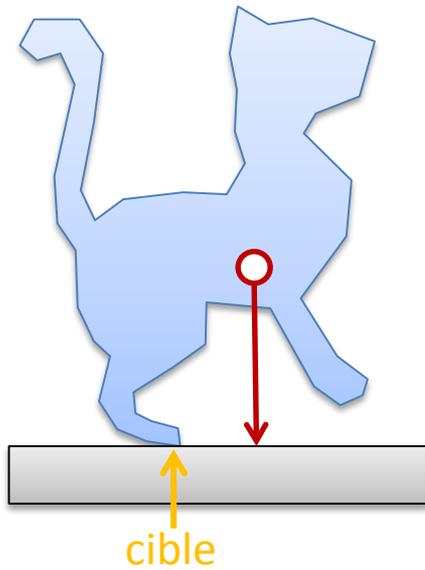
$$E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O) = \frac{\lambda}{2} V_O^T M_{\text{Lap}} V_O$$

- Expression quadratique à partir des sommets de Mo
- Dérivable



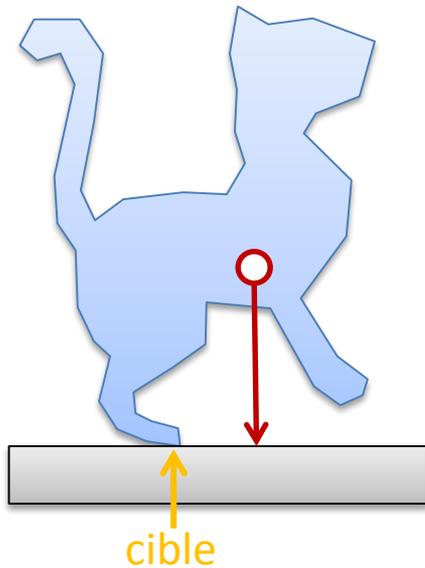
Optimisation: résumé

Optimisation: résumé



Optimisation: résumé

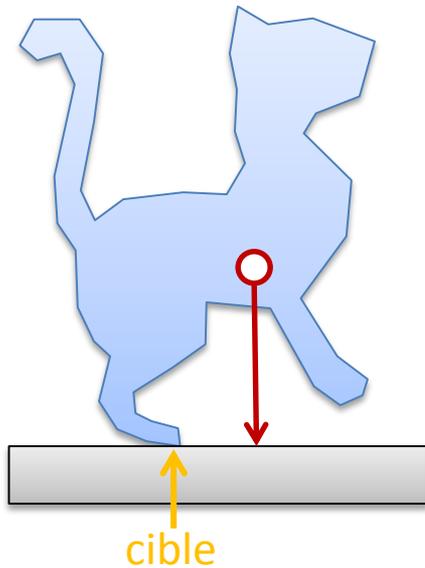
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



Optimisation: résumé

- Intialisation: $\mathcal{M}_I = \emptyset$, $\mathcal{M}_O = 0$

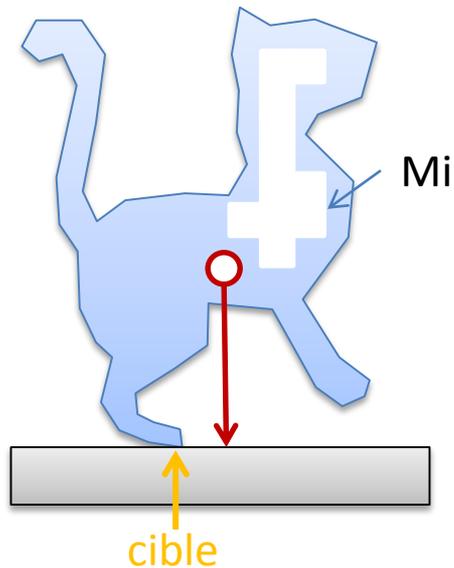
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{C \circ M}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



Optimisation: résumé

- Etape 1: M_i (sélection)

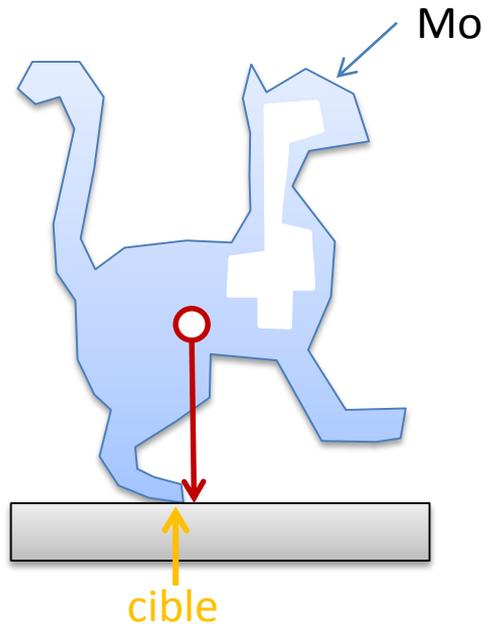
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



Optimisation: résumé

- Etape 2: \mathcal{M}_O , descente de gradient

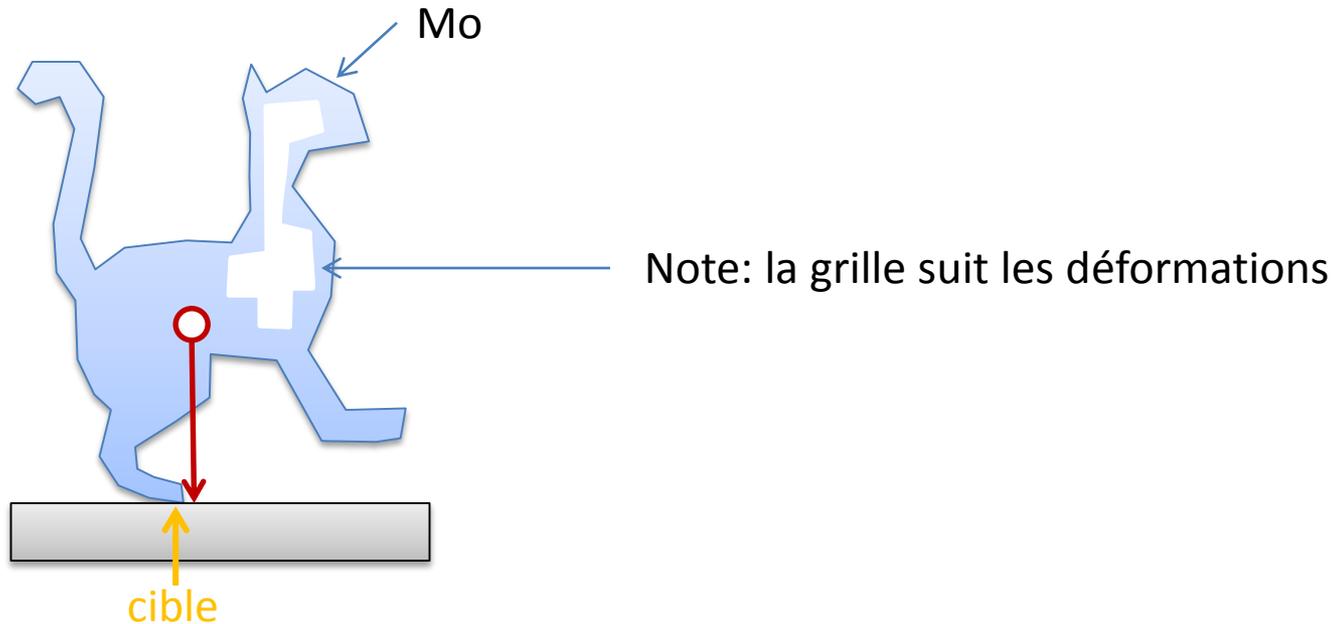
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{C \circ M}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



Optimisation: résumé

- Etape 2: Mo, descente de gradient

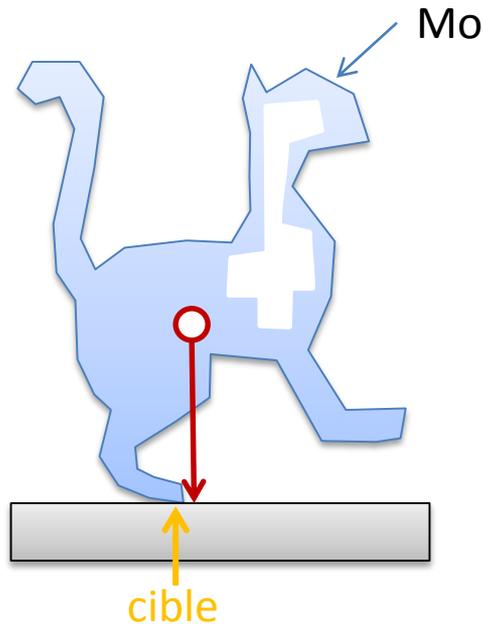
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



Optimisation: résumé

- Etape 3: Itère, sauf si équilibre atteint

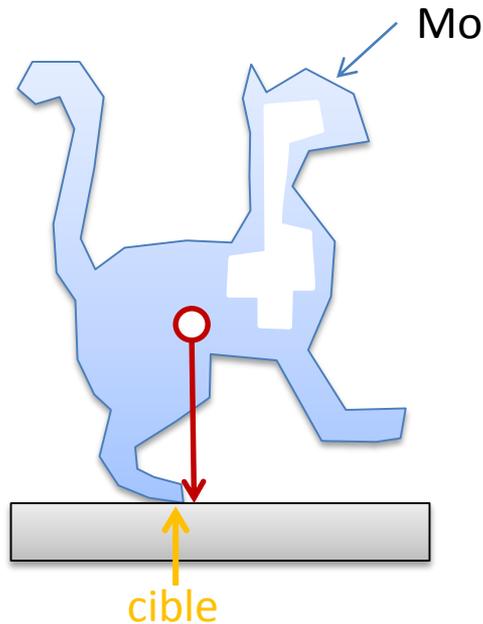
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



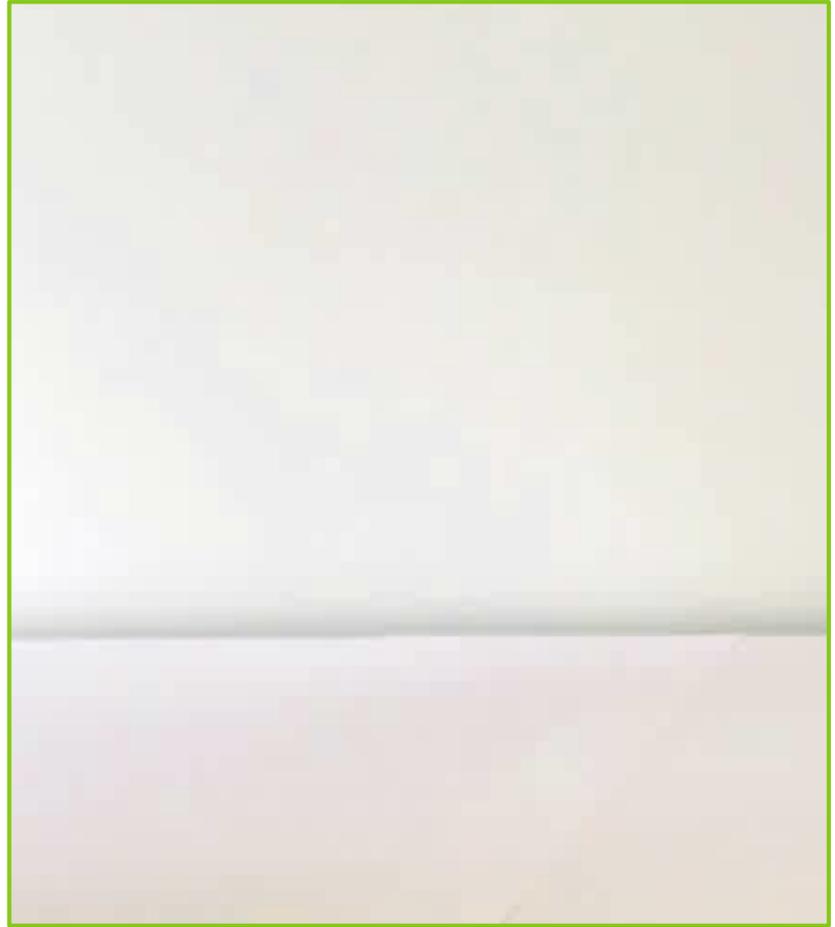
Optimisation: résumé

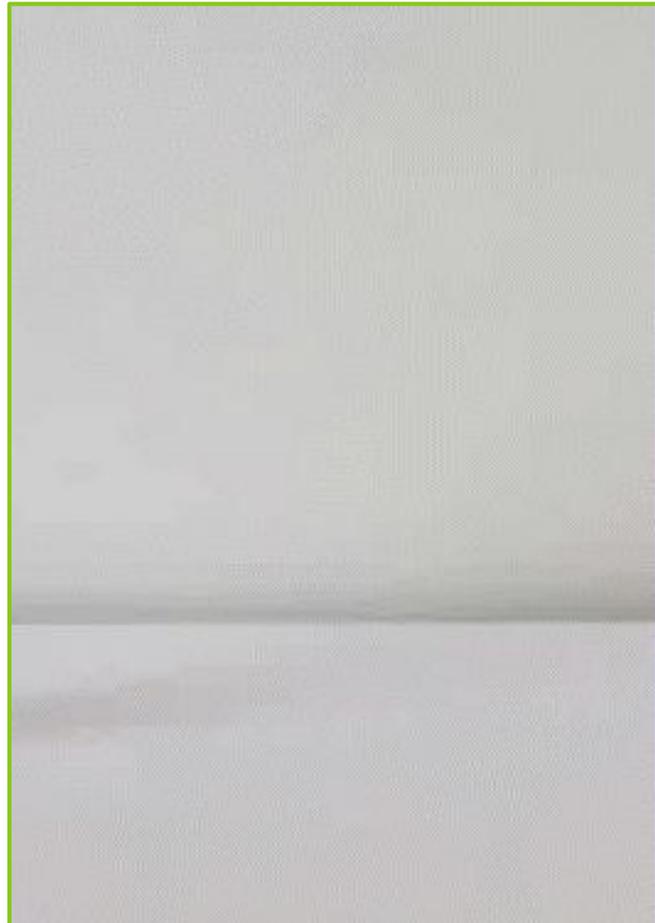
- Etape 3: Itère, sauf si équilibre atteint

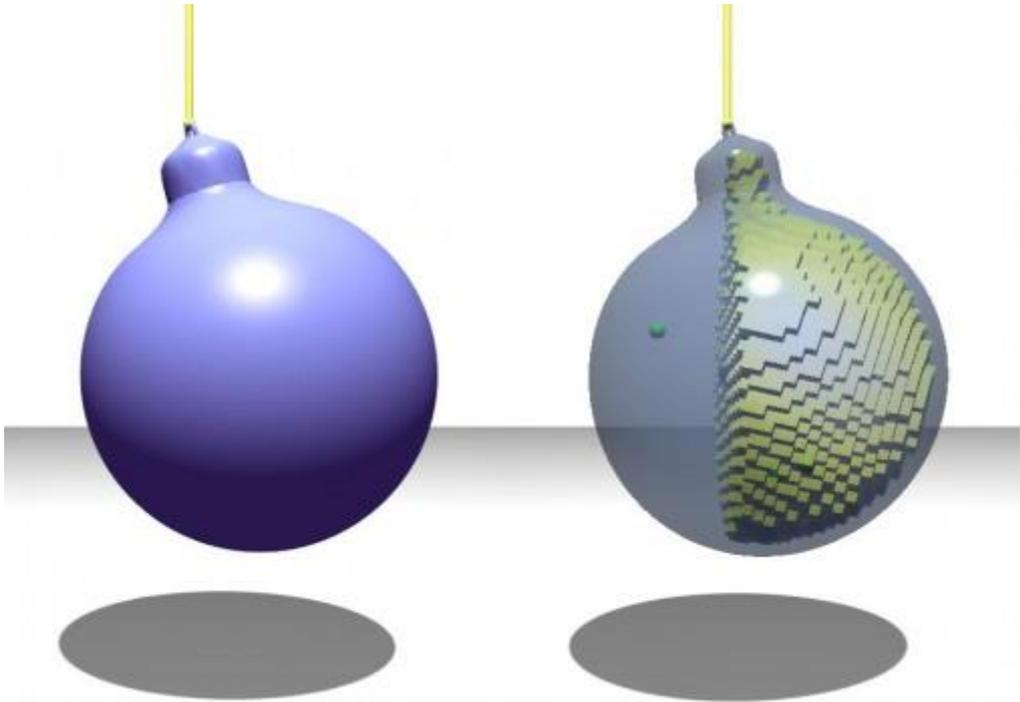
$$\operatorname{argmin}_{\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O} (1 - \mu) E_{CoM}(\mathcal{M}_I, \mathcal{M}_O) + \mu E_{\mathcal{M}}(\mathcal{M}_O)$$



x2







Plan

- Equilibrage d'objets personnalisés

Make it stand

R. Prévost, E. Whiting, S. Lefebvre, O. Sorkine

Transactions on Graphics 2013

- Equilibrage pour la fabrication

Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing

J. Dumas, J. Hergel, S. Lefebvre

Transactions on Graphics 2014

Plan

- Equilibrage d'objets personnalisés

Make it stand

R. Prévost, E. Whiting, S. Lefebvre, O. Sorkine

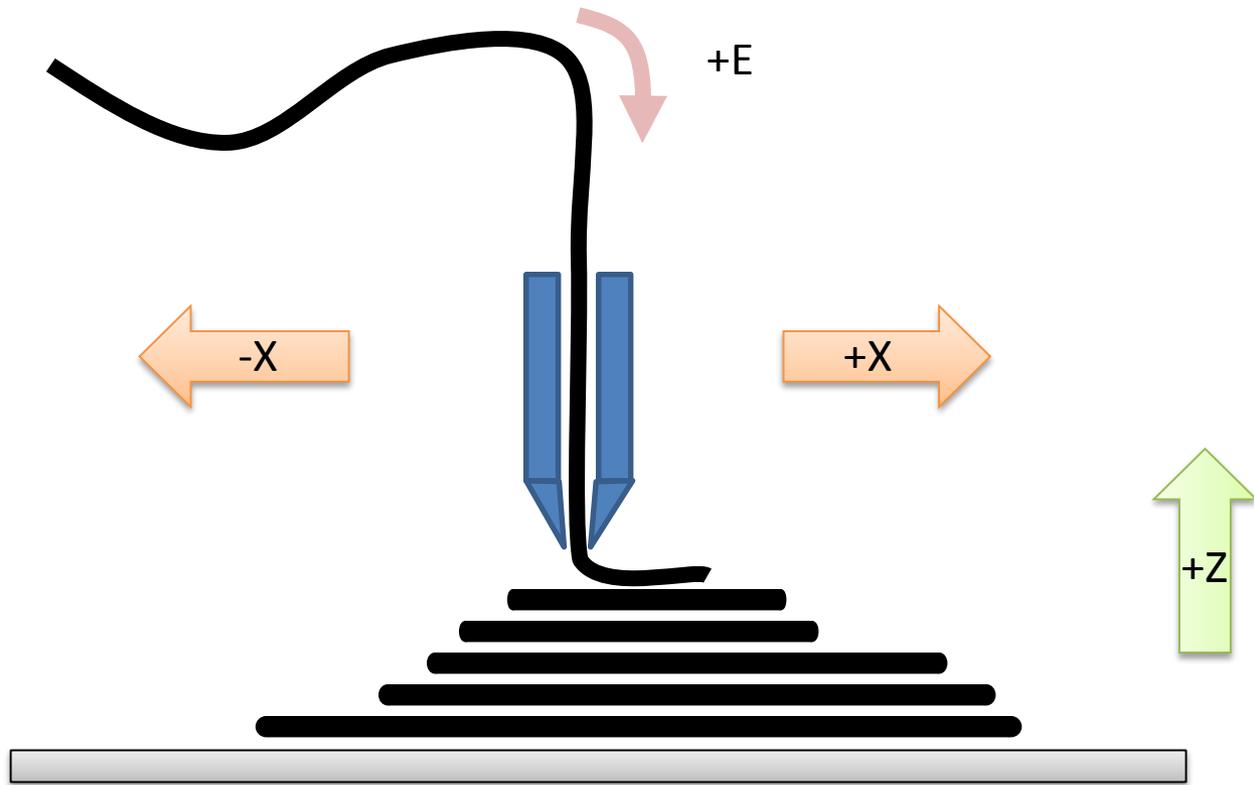
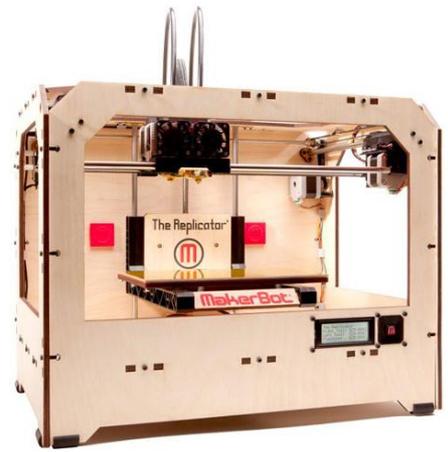
Transactions on Graphics 2013

- Equilibrage pour la fabrication

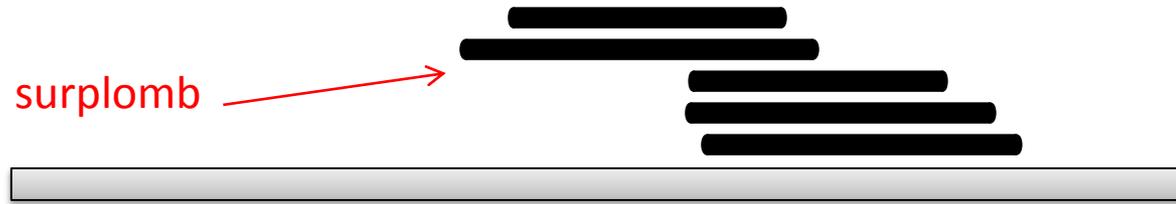
Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing

J. Dumas, J. Hergel, S. Lefebvre

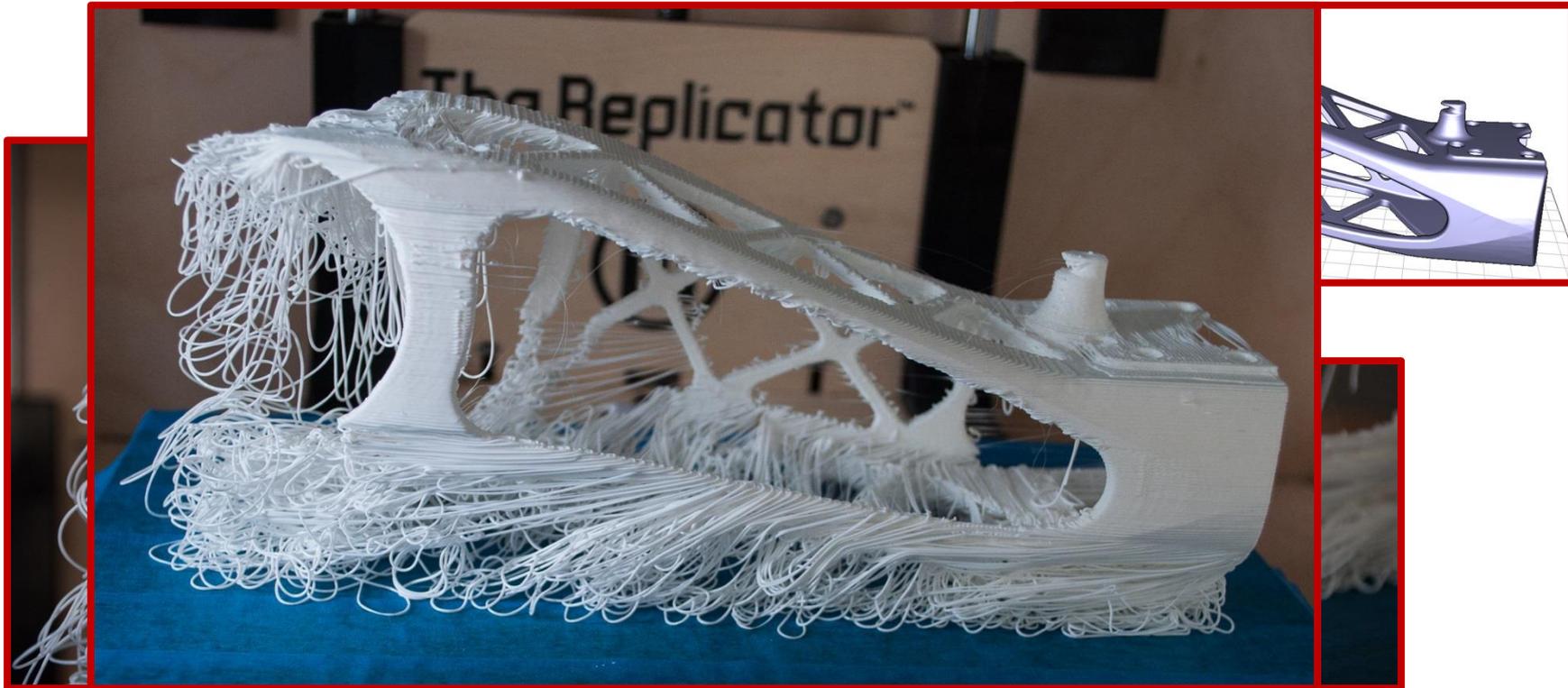
Transactions on Graphics 2014



Surplombs



Impression 3D: la pratique



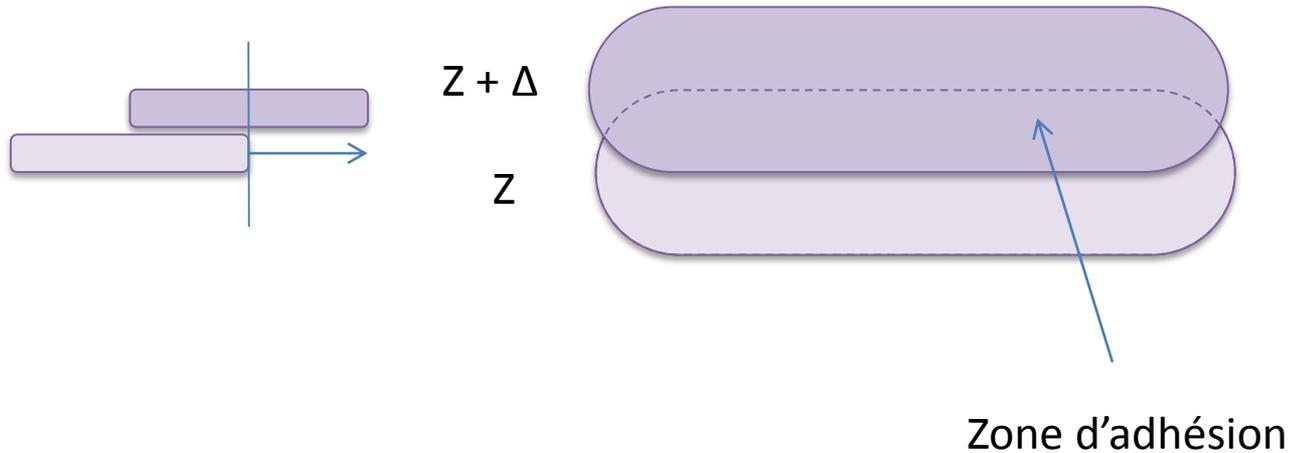
Supports classiques

- Extrusion vers le bas
- Remplissage faible

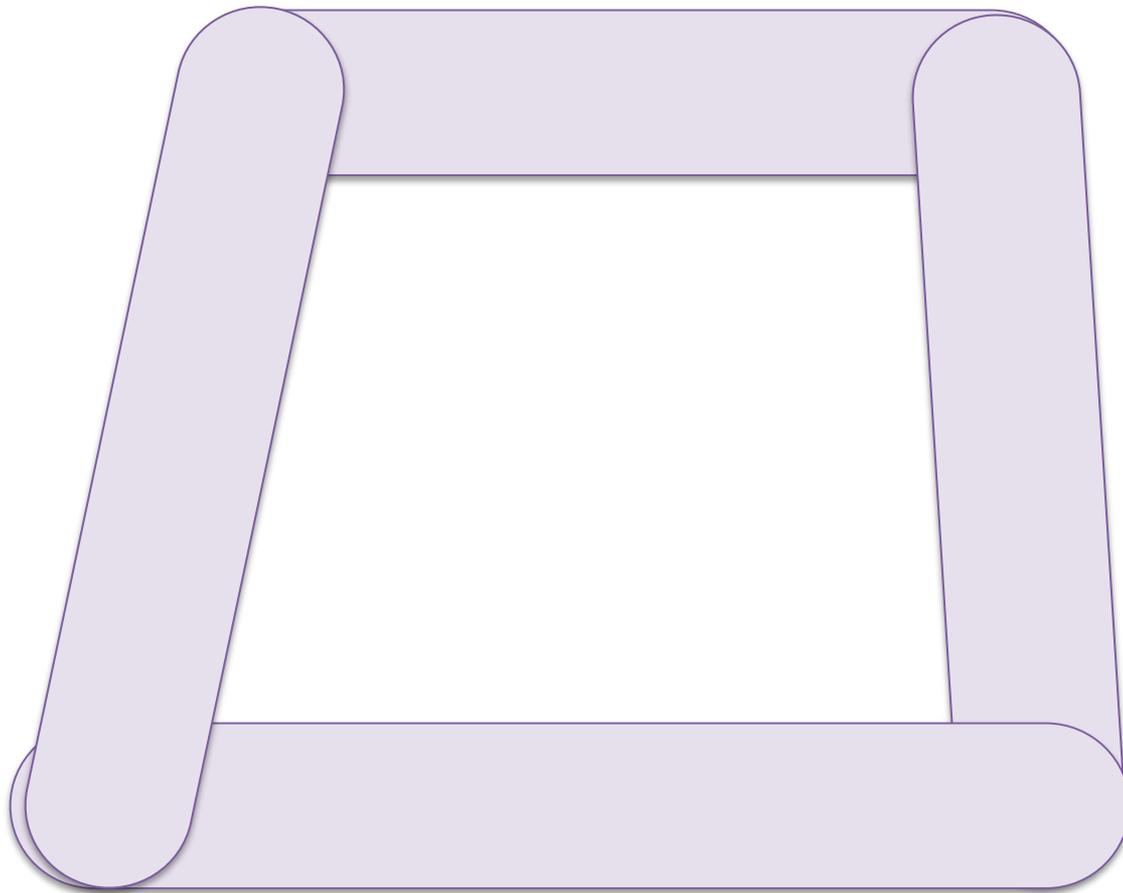


Que doit on supporter?

- Adhésion limite?

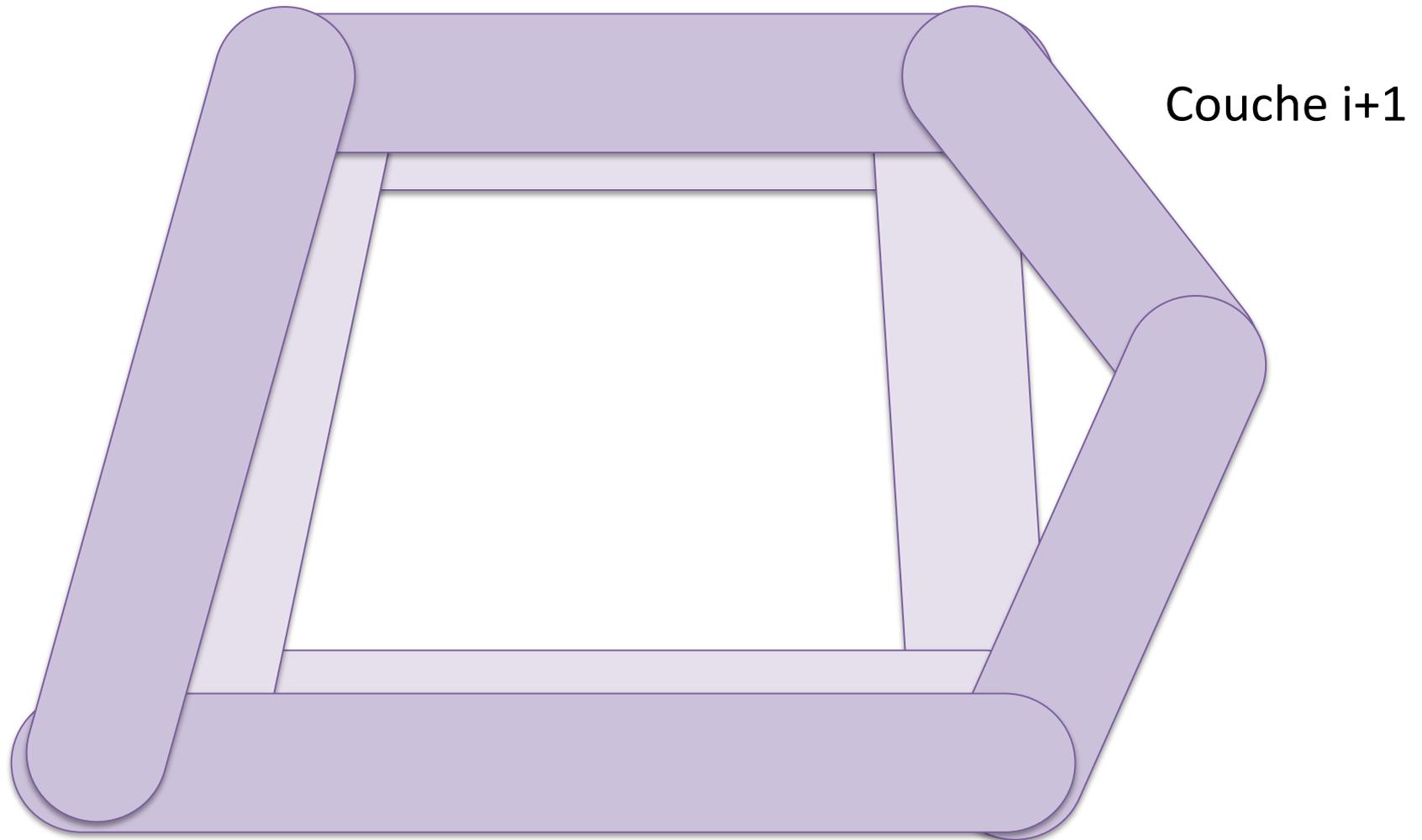


Filament

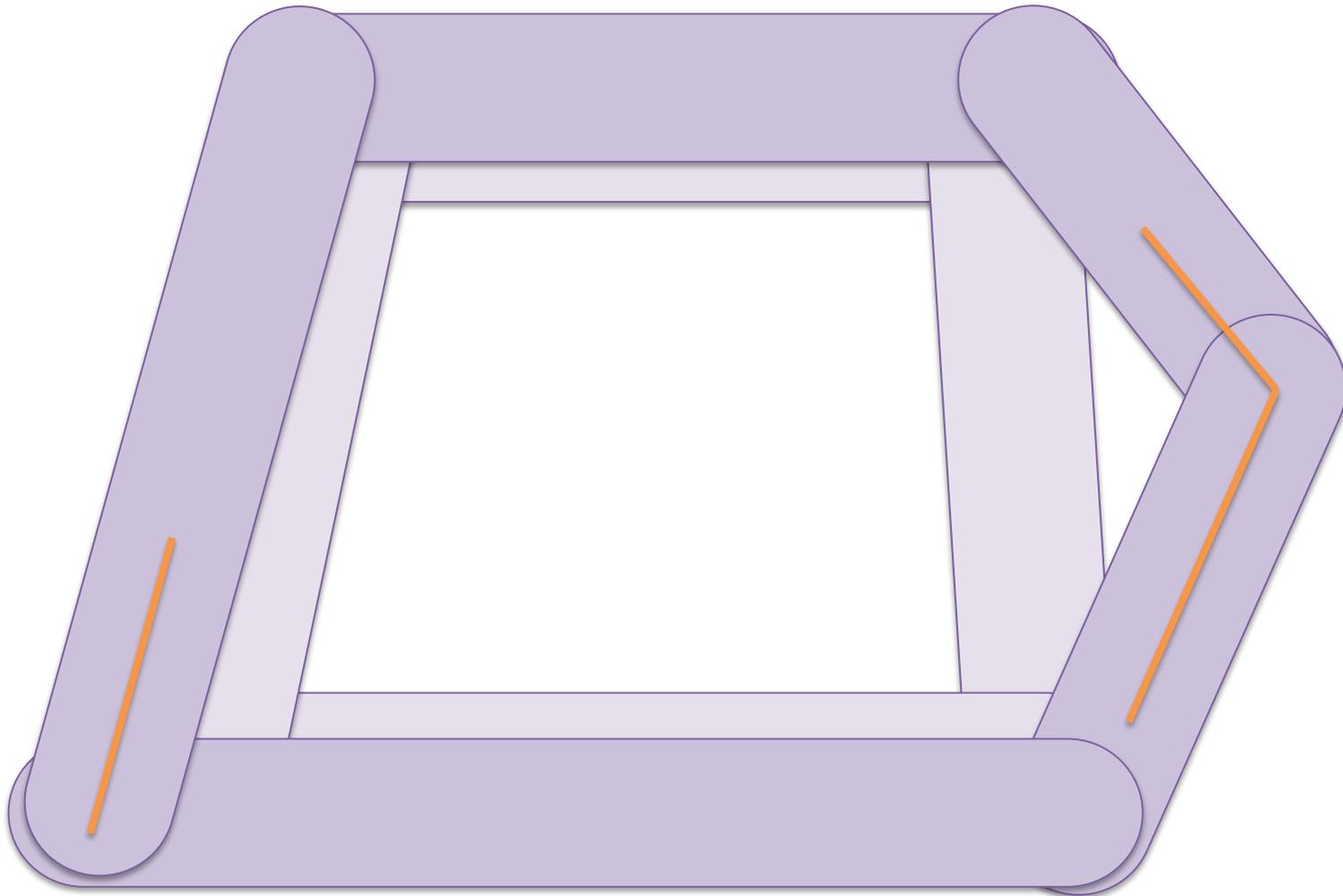


Couche i

Filament

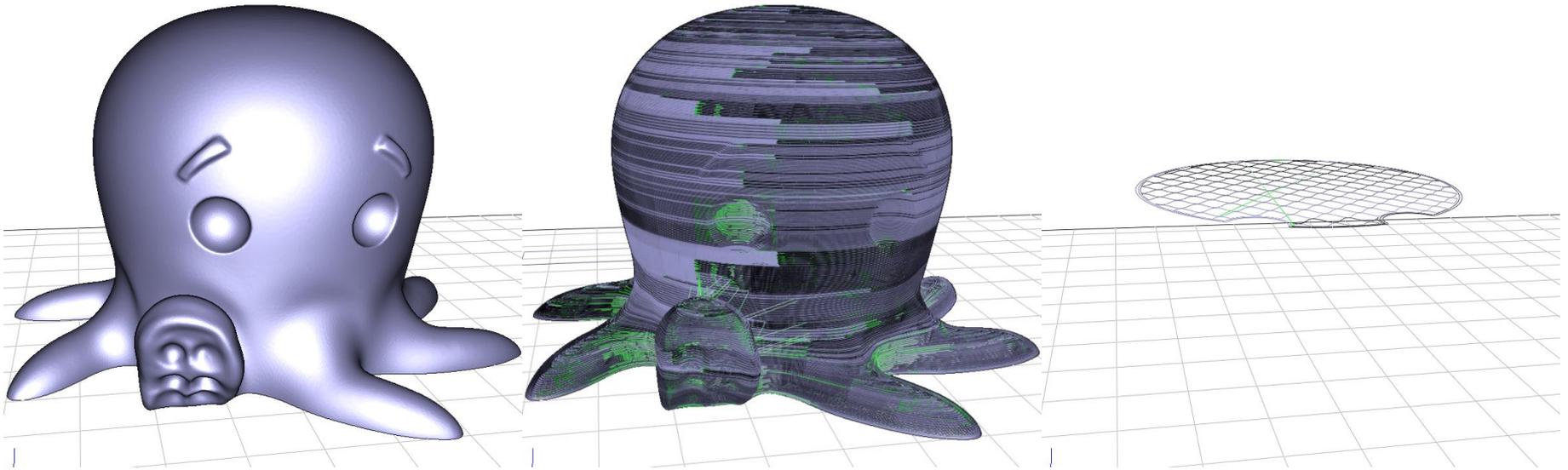


Filament



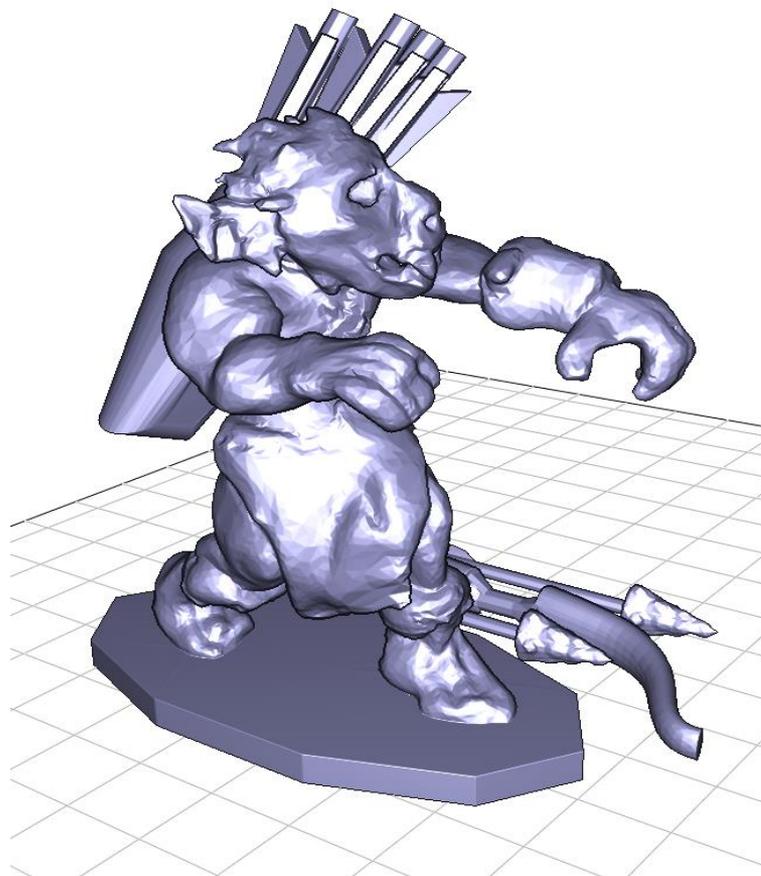
Détection

- Maillage → tranchage → chemins



[thing:27053](#)

Détection



[thing:347046](#)

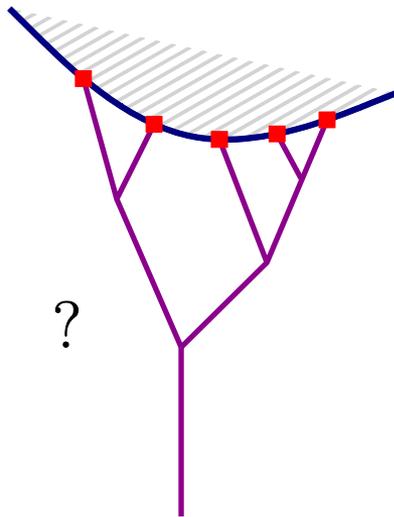
Supports arborescents

- MeshMixer
 - ✓ Utilise peu de matière
 - ✗ Structure non équilibrée
 - ✗ Requiert des ajustements manuels

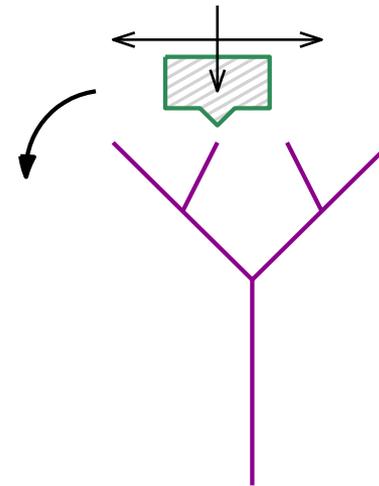


Arbres – Avantages, inconvénients

✓ Support/longueur



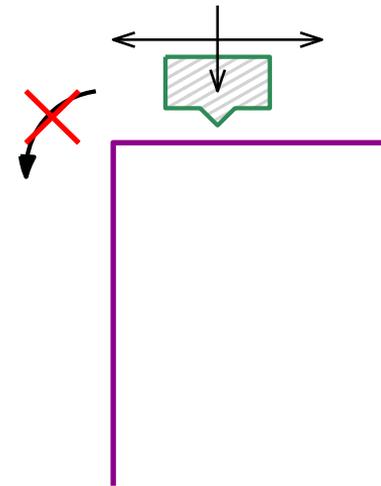
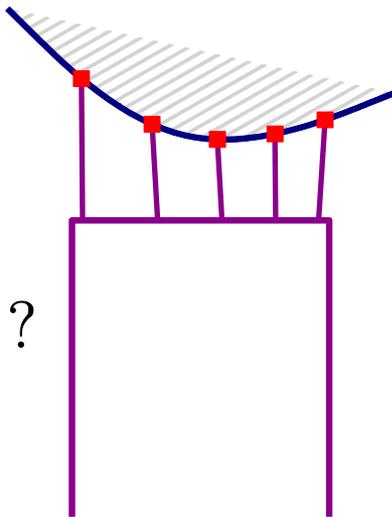
✗ Sensibles aux efforts de **couple**



Intuition: Ponts!

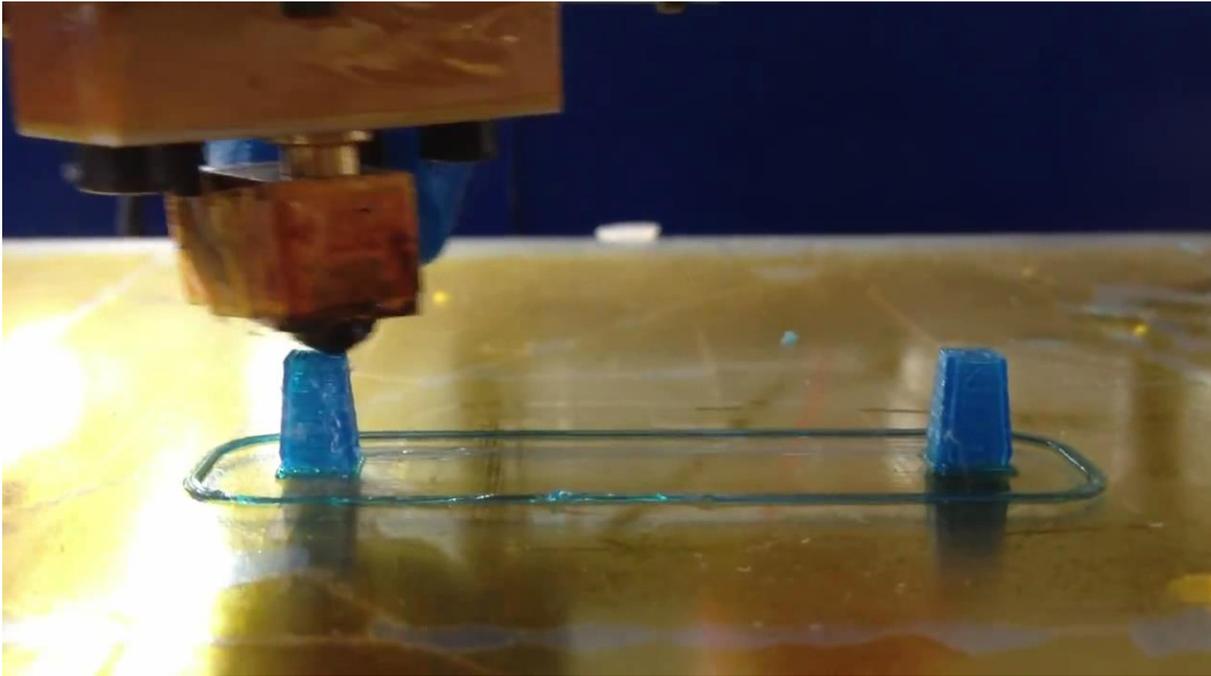
✓ Support/longueur

✓ Résistants aux efforts de couple

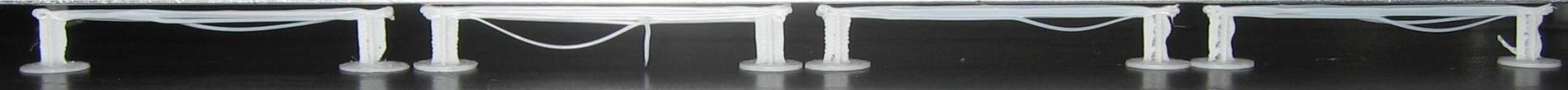
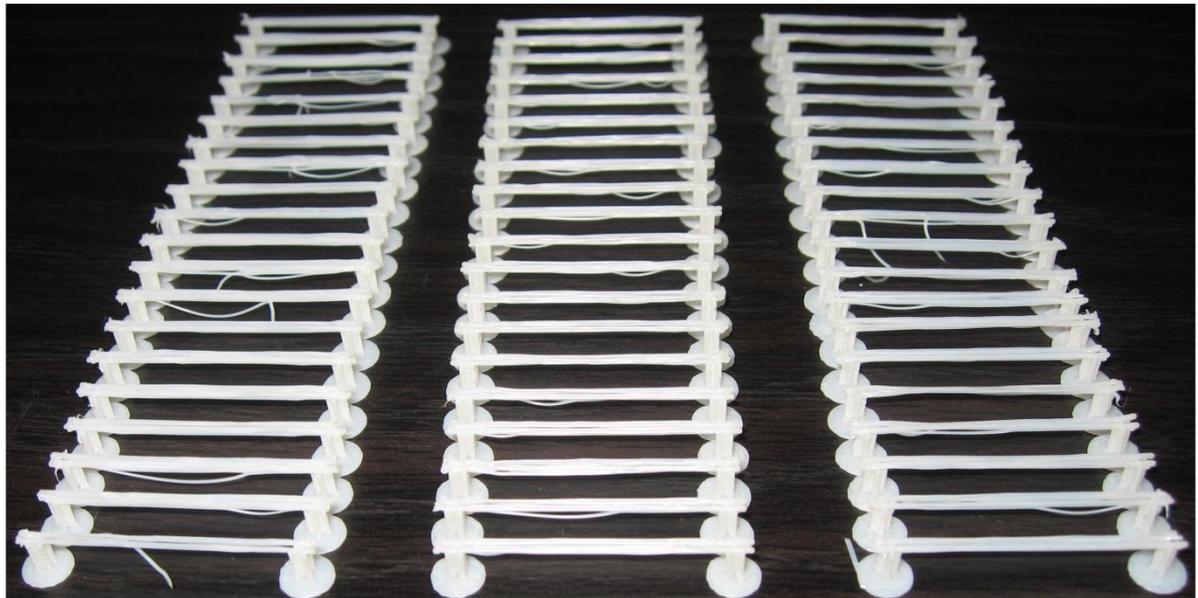


Imprimer des ponts?

Imprimer des ponts?



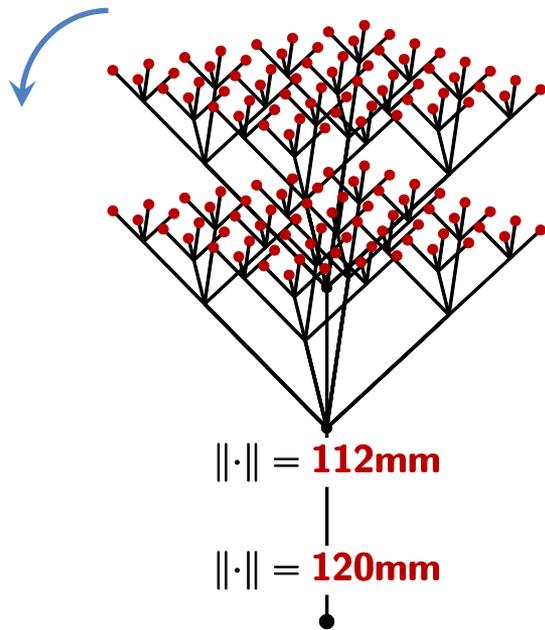
Video: <http://youtu.be/wK2APNwEoS>



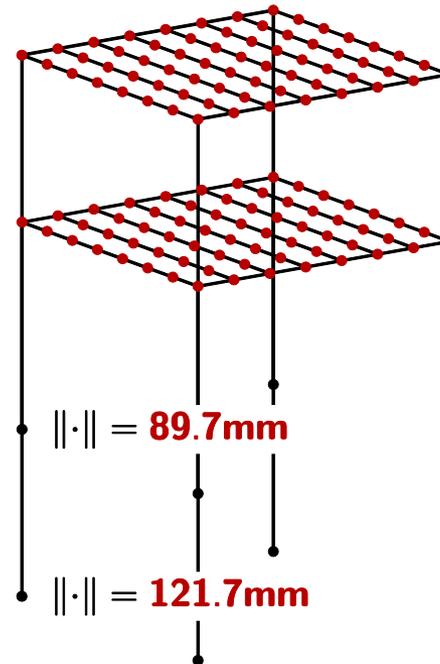


Utilisation matière

✓ Compétitif



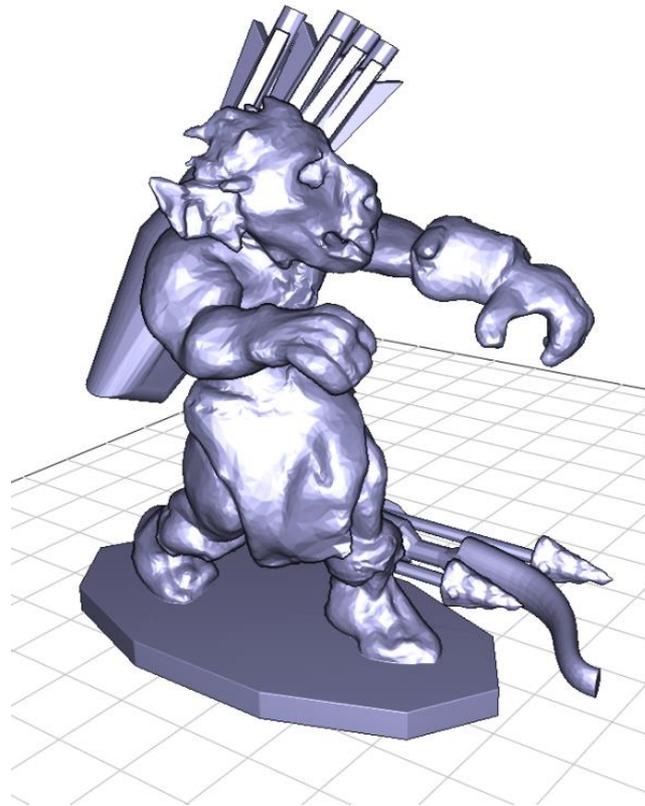
...jusqu'à une certaine hauteur



Efforts de couple



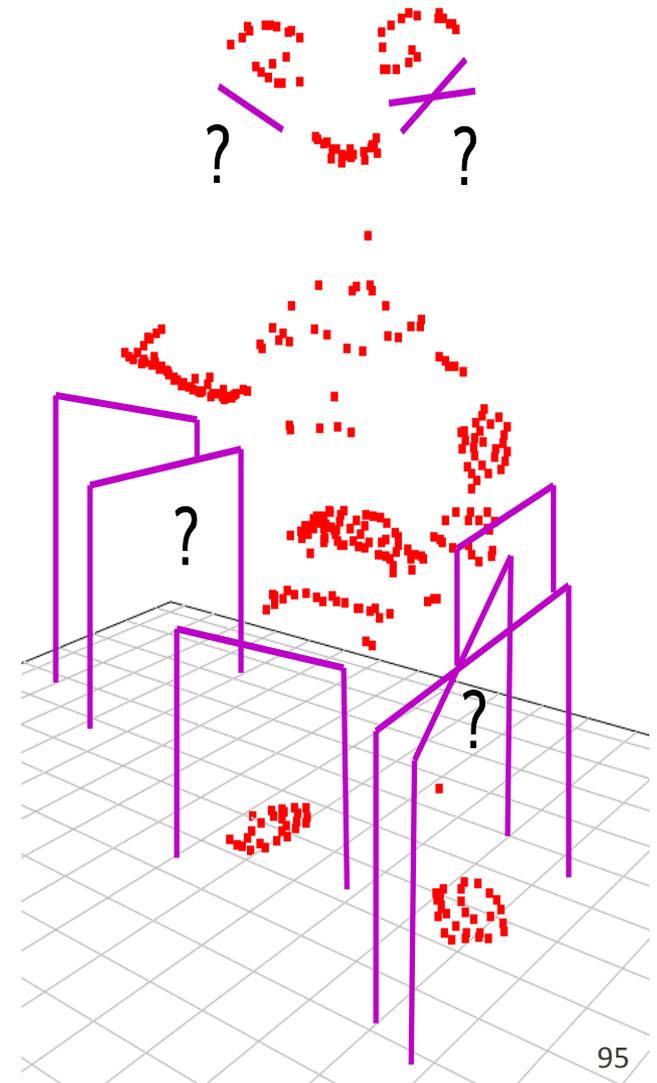
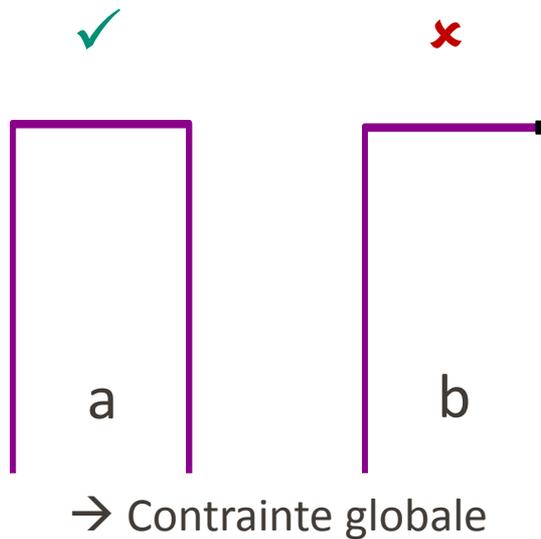
Optimisation d'un échaffaudage



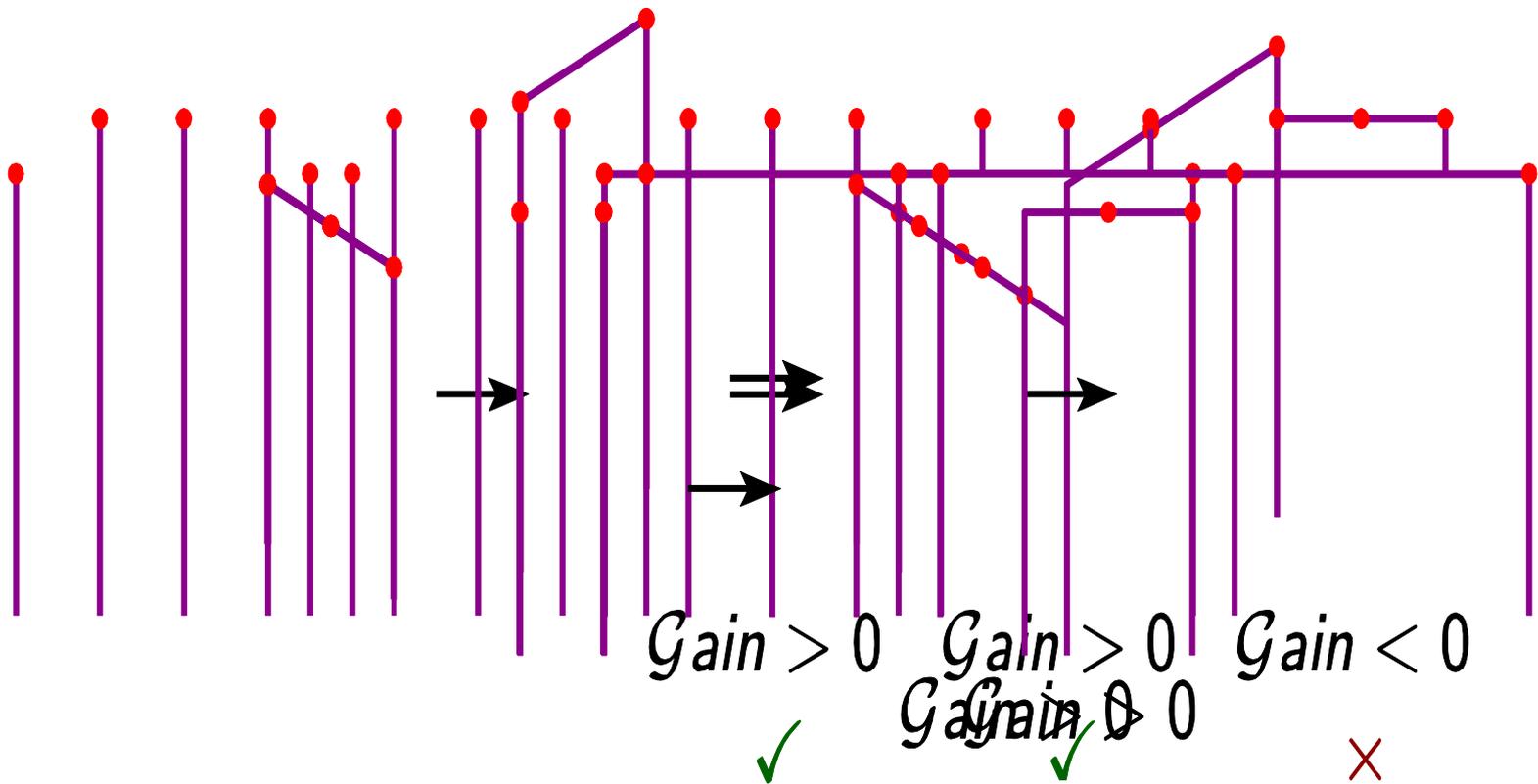
[thing:347046](https://www.thingiverse.com/thing/347046)

Formulation du problème

- Entrée: Points à supporter
- Sortie: Echaffaudage *valide*

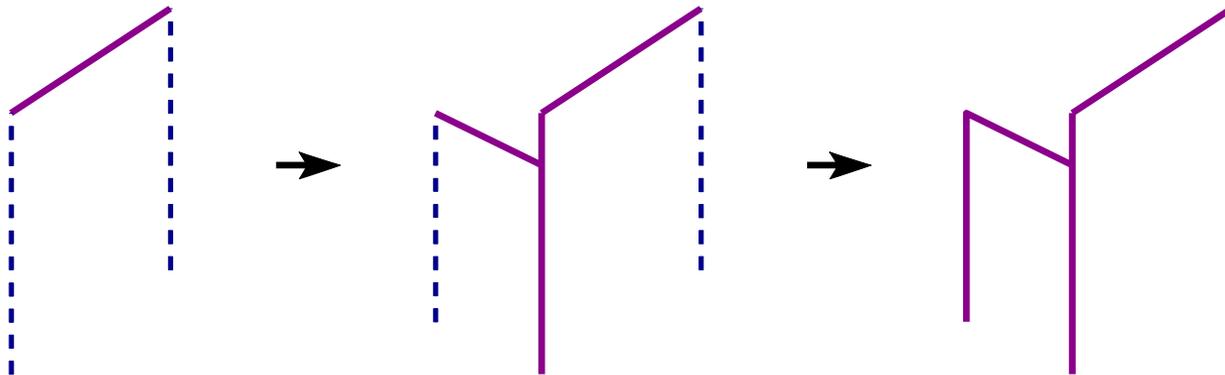


Objectif: Echaffaudage *de longueur minimale*



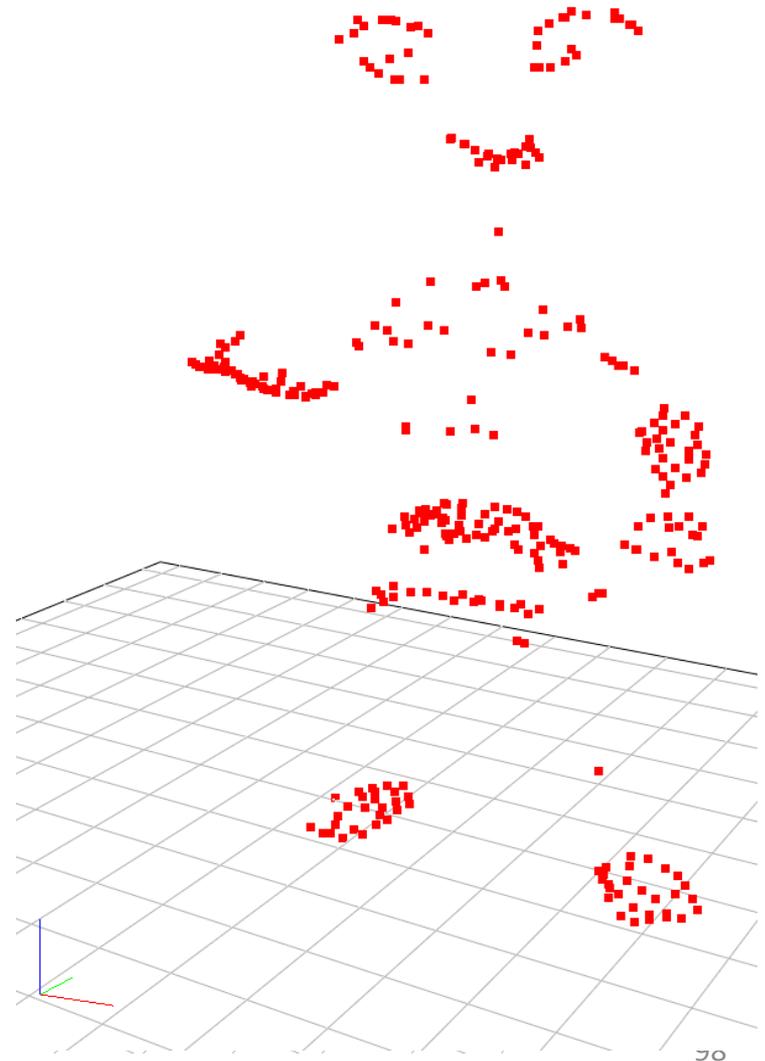
Trouver le **minimum global**?

- Arbres rectilignes de Steiner + contraintes (piliers)
- Question ouverte



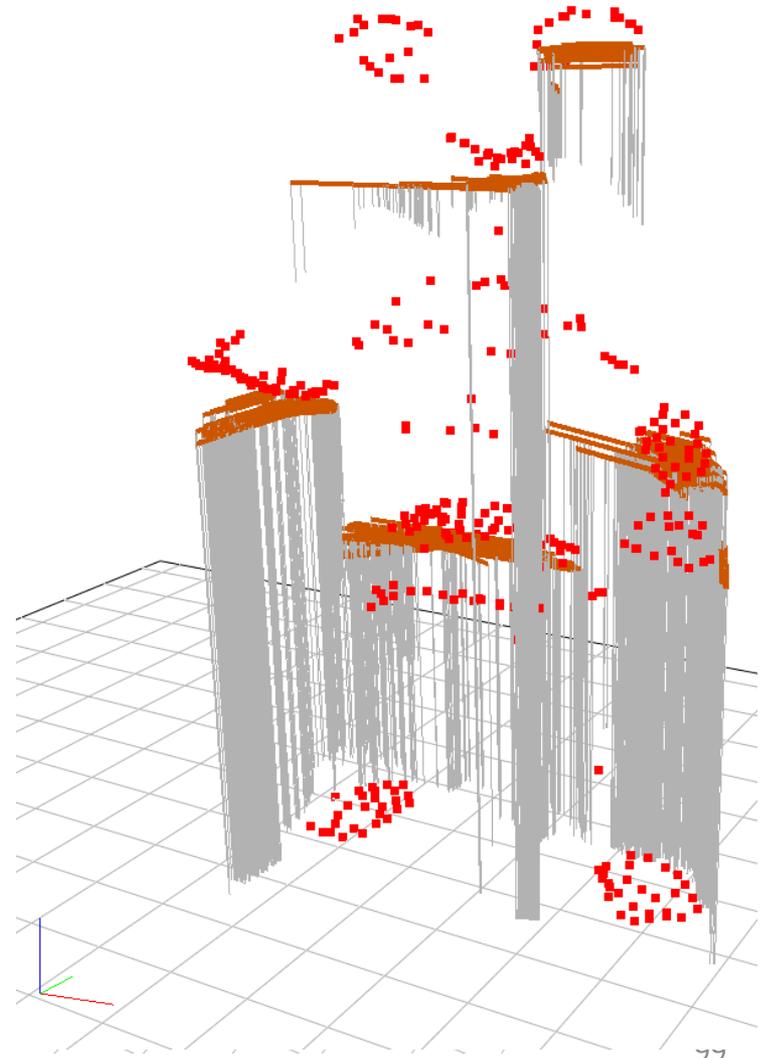
Vue d'ensemble

1. Points à supporter



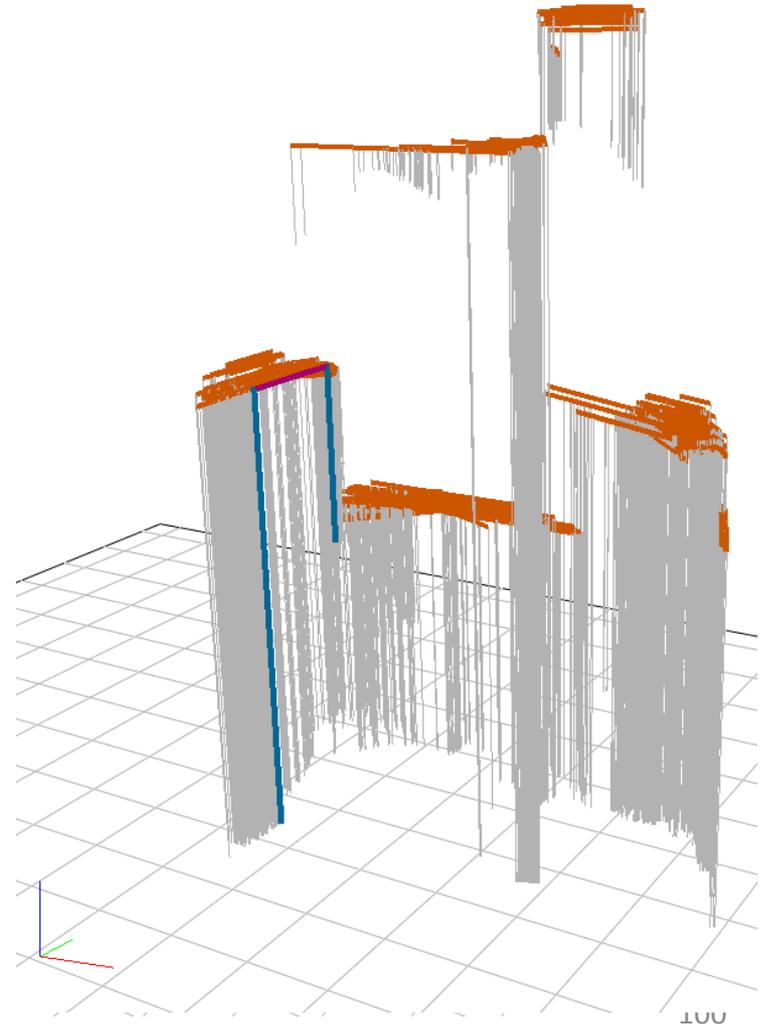
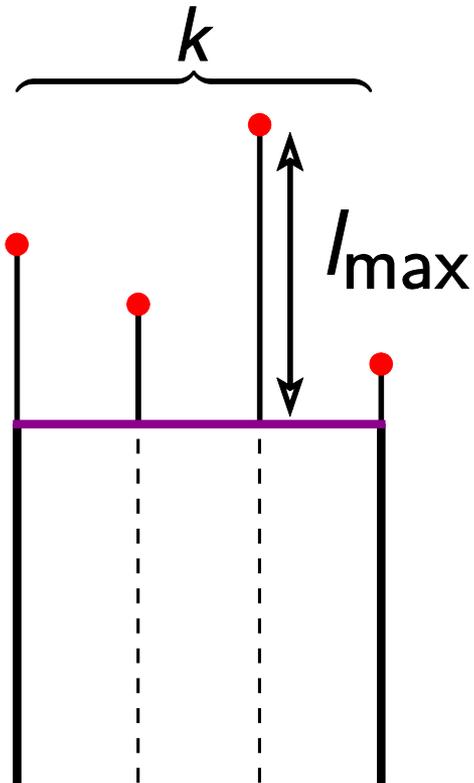
Vue d'ensemble

2. Ponts candidats



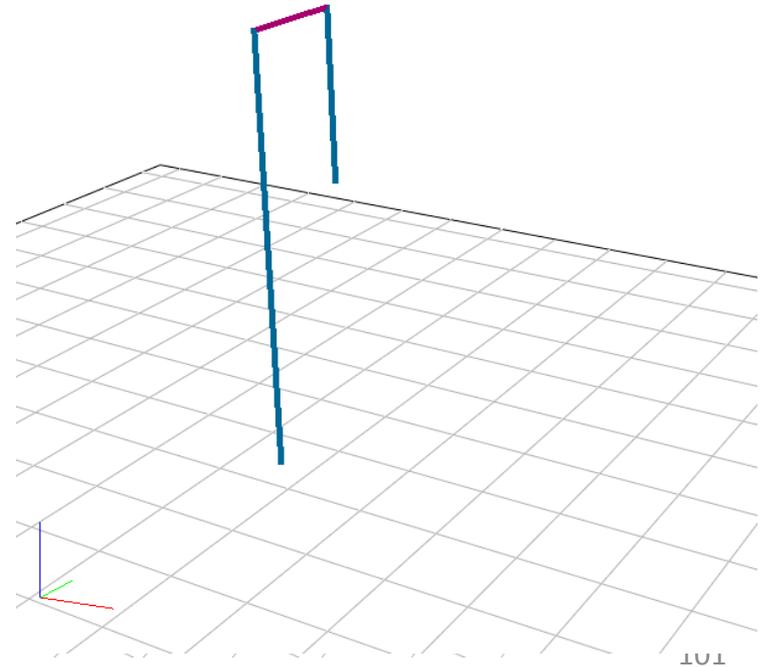
Vue d'ensemble

3. $\text{Score} = \text{Gain} - k \cdot l_{\max}$



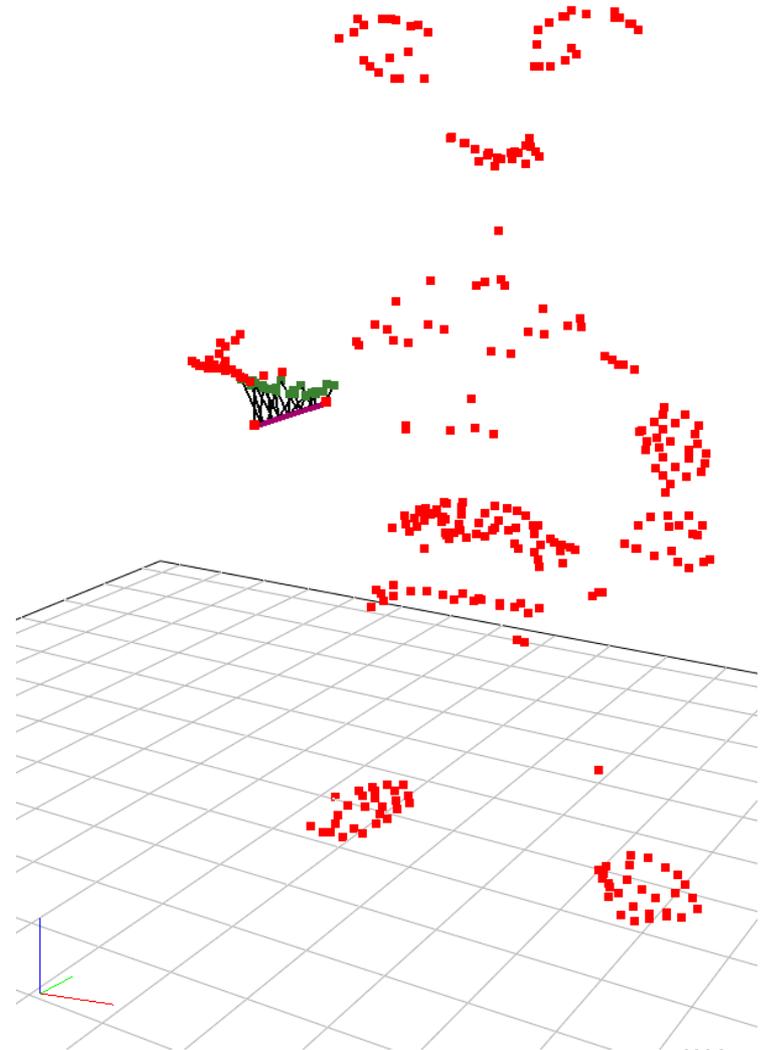
Vue d'ensemble

4. Sélection opportuniste

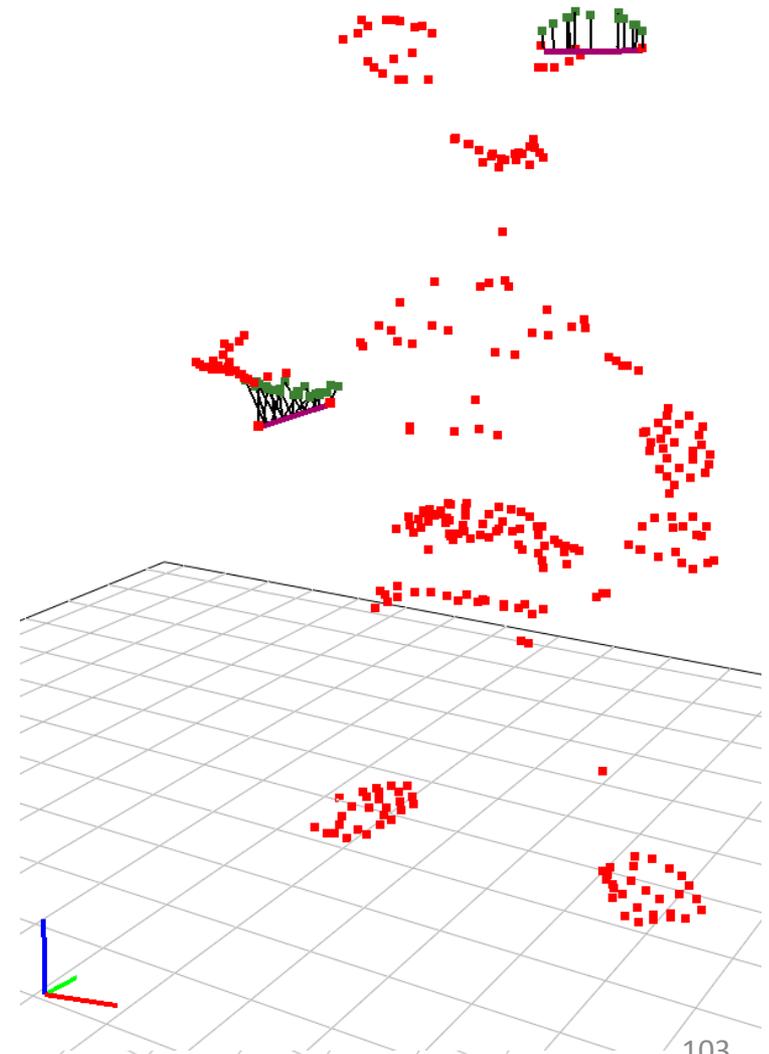
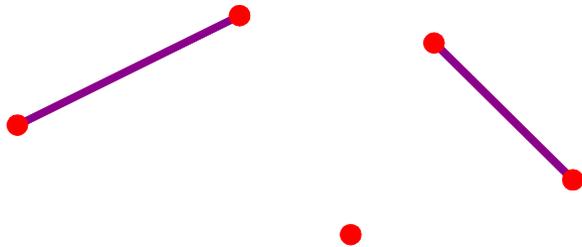
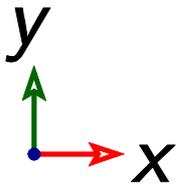


Vue d'ensemble

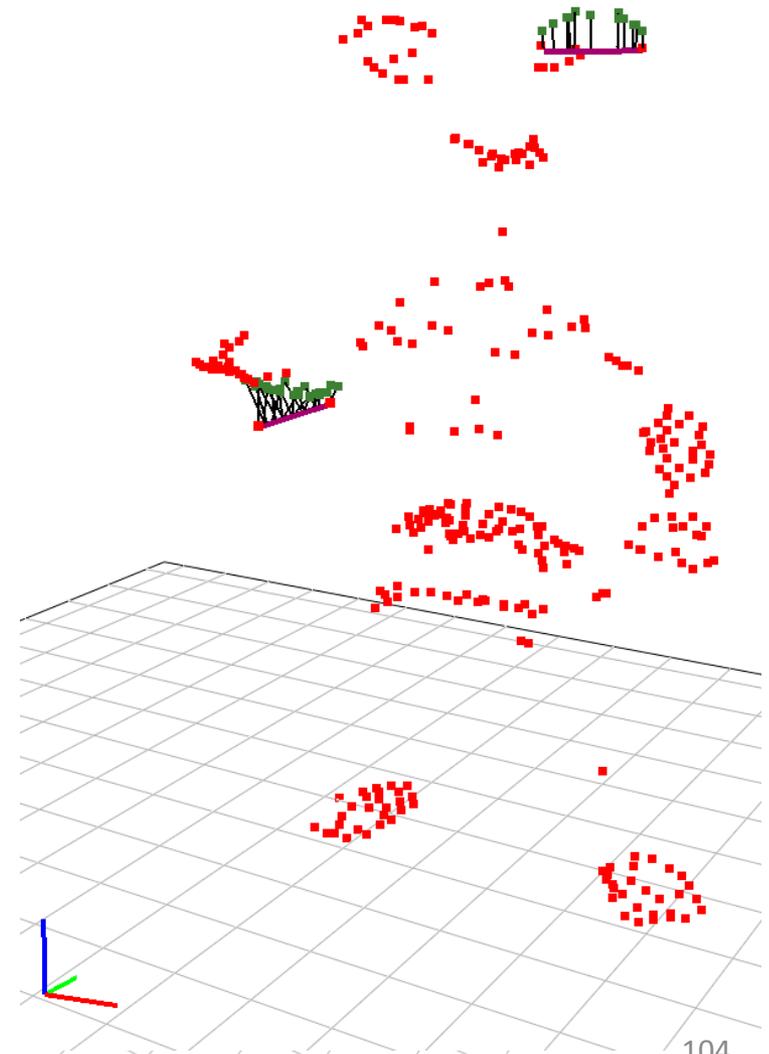
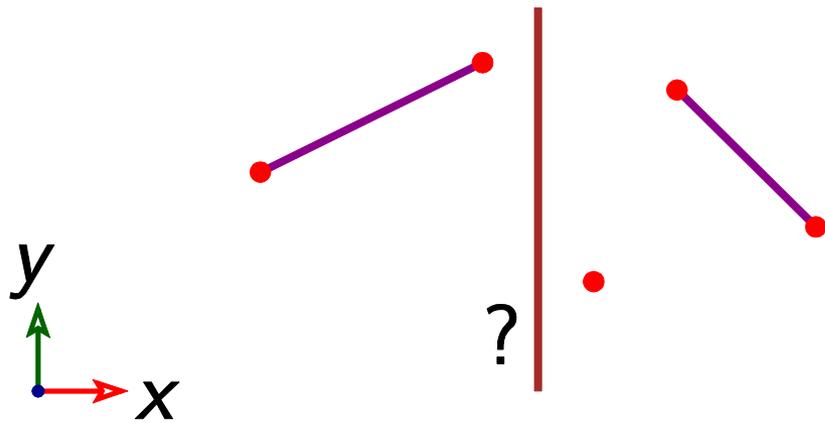
5. Itérer



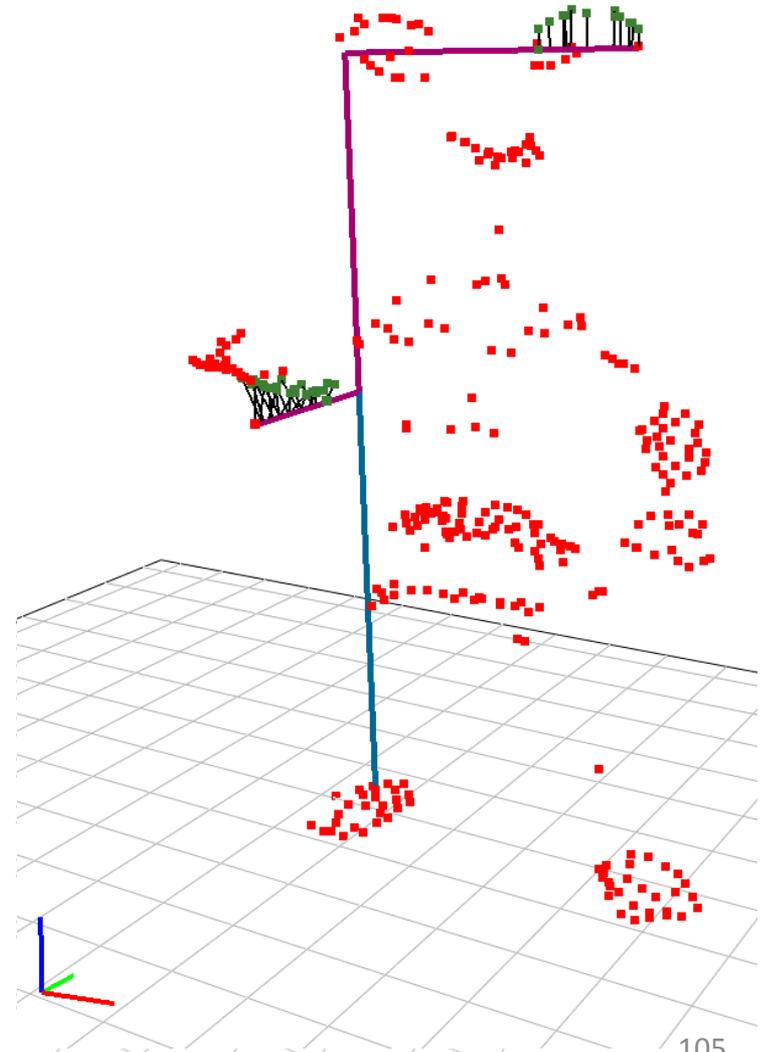
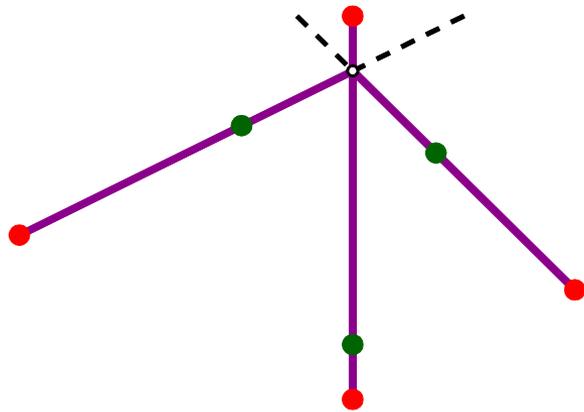
Recherche des ponts candidats



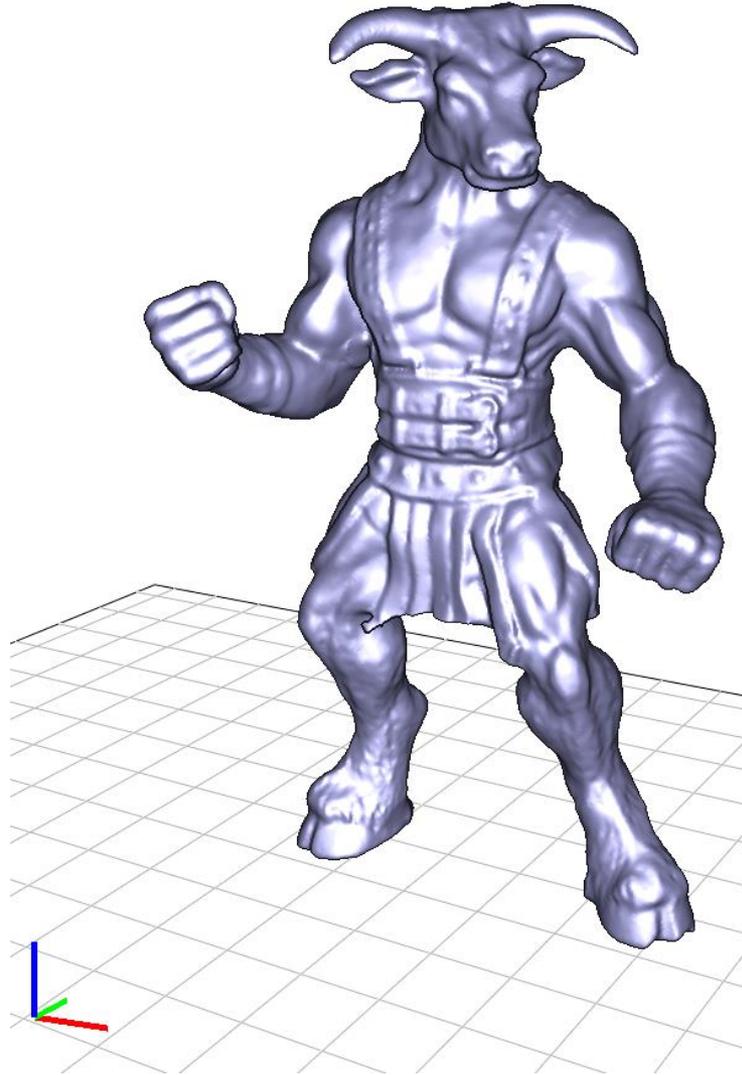
Recherche des ponts candidats



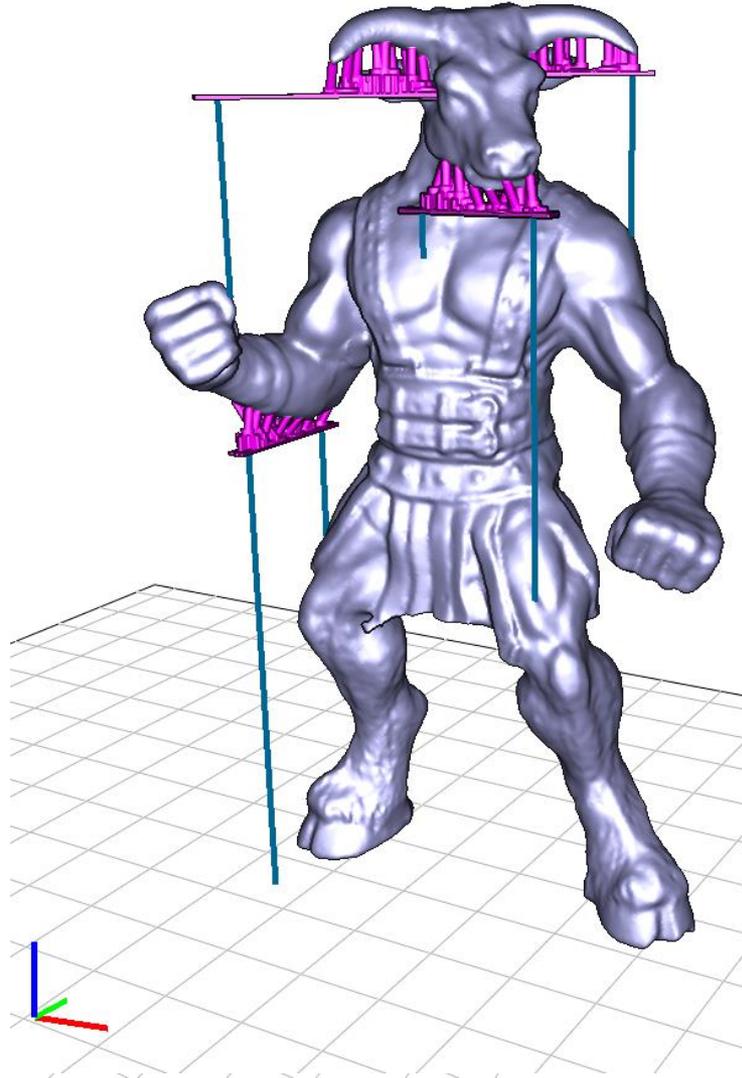
Recherche des ponts candidats



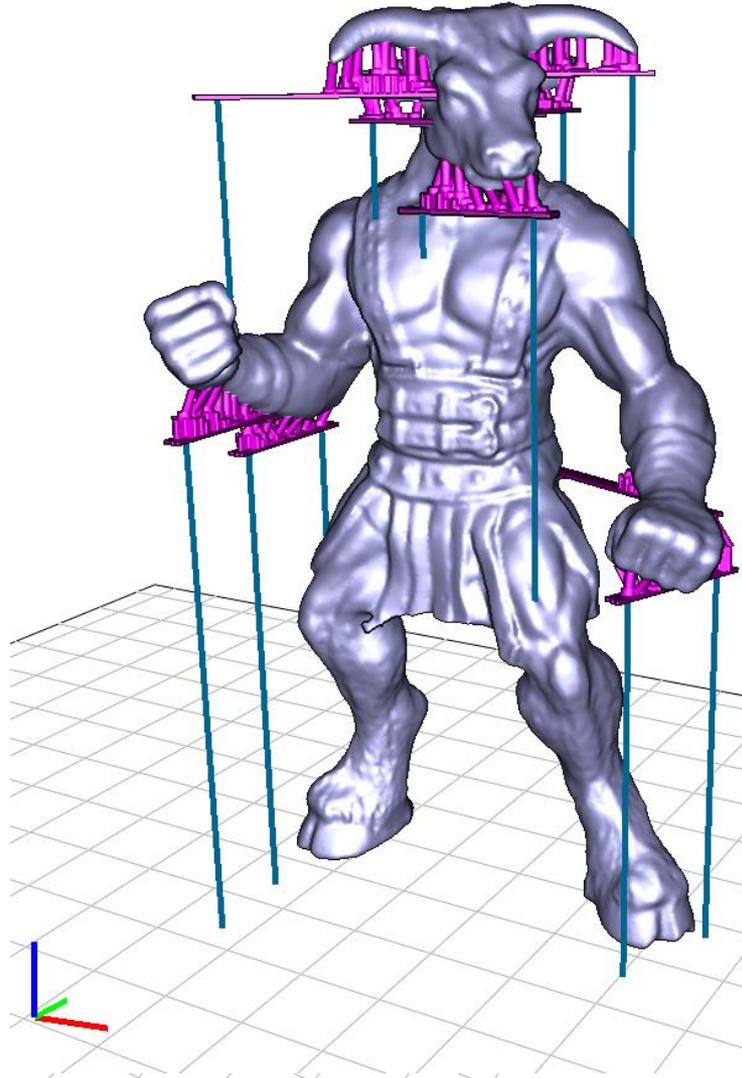
Exemple



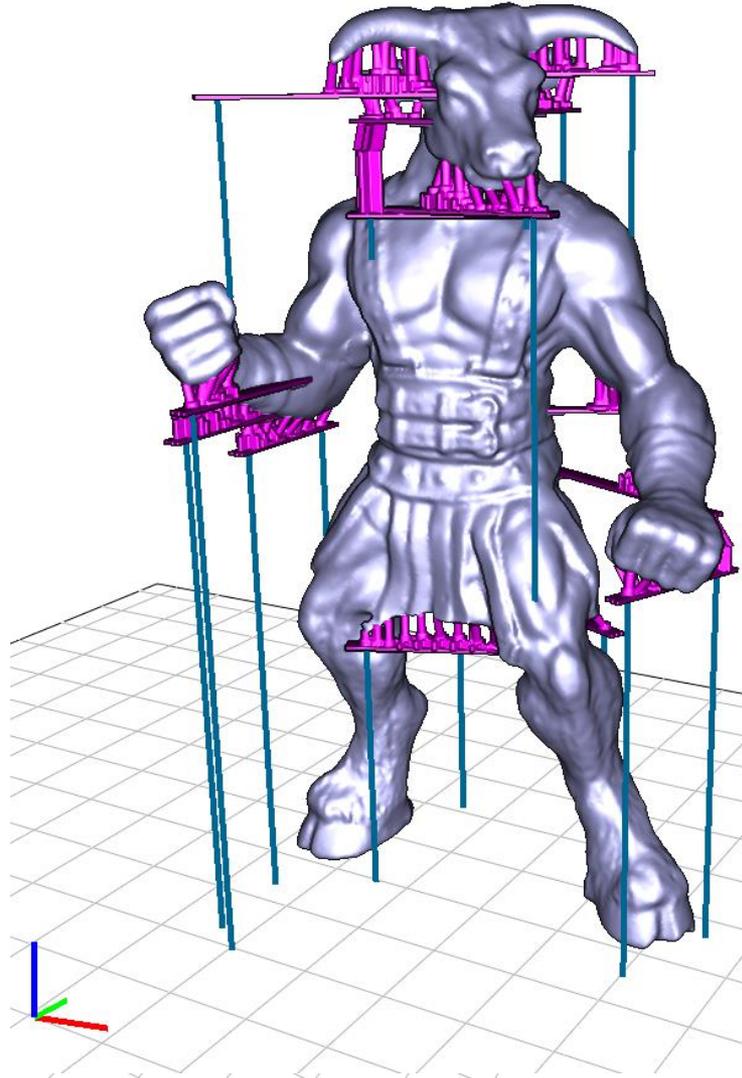
Exemple



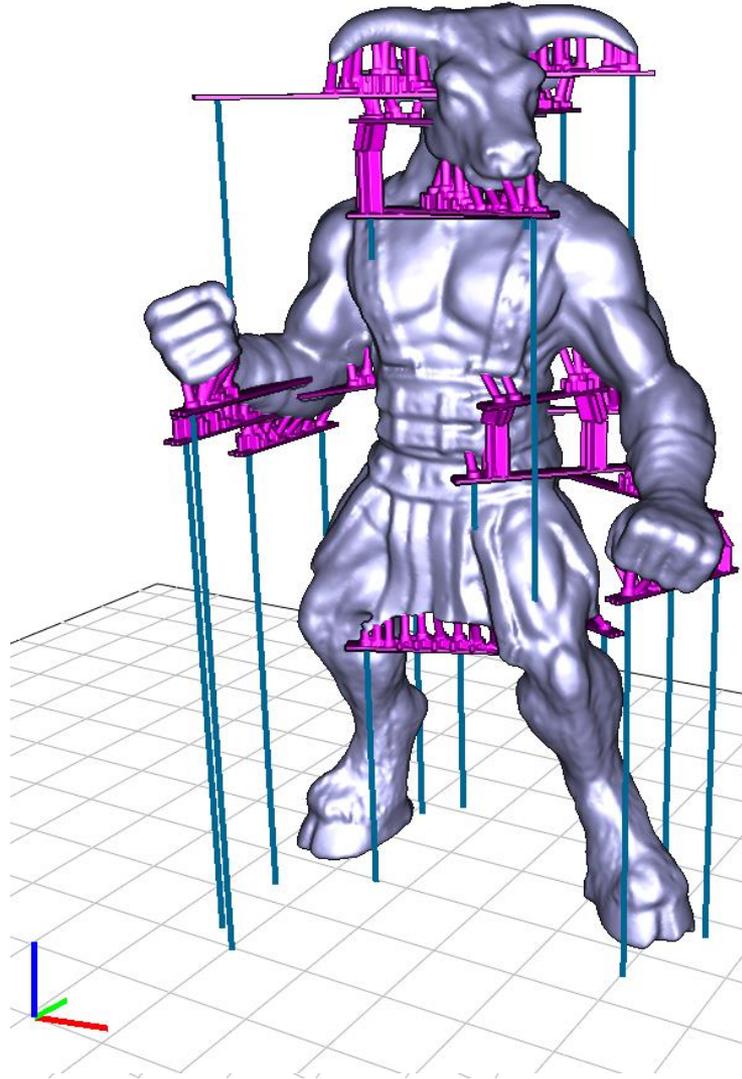
Exemple



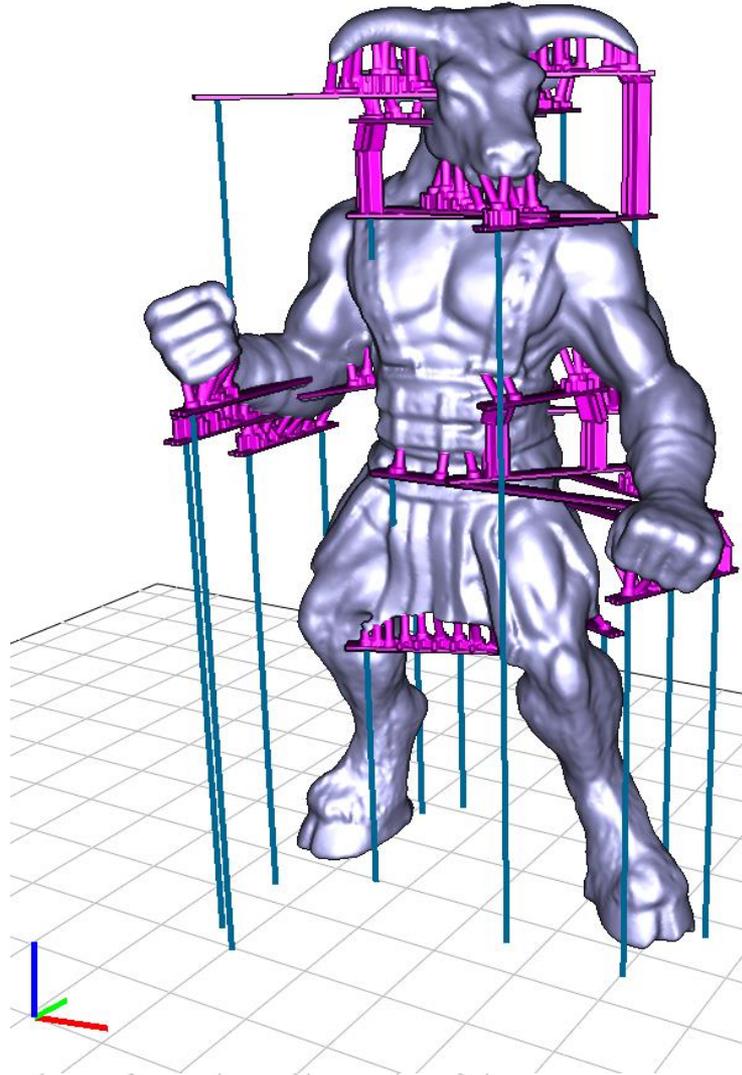
Exemple



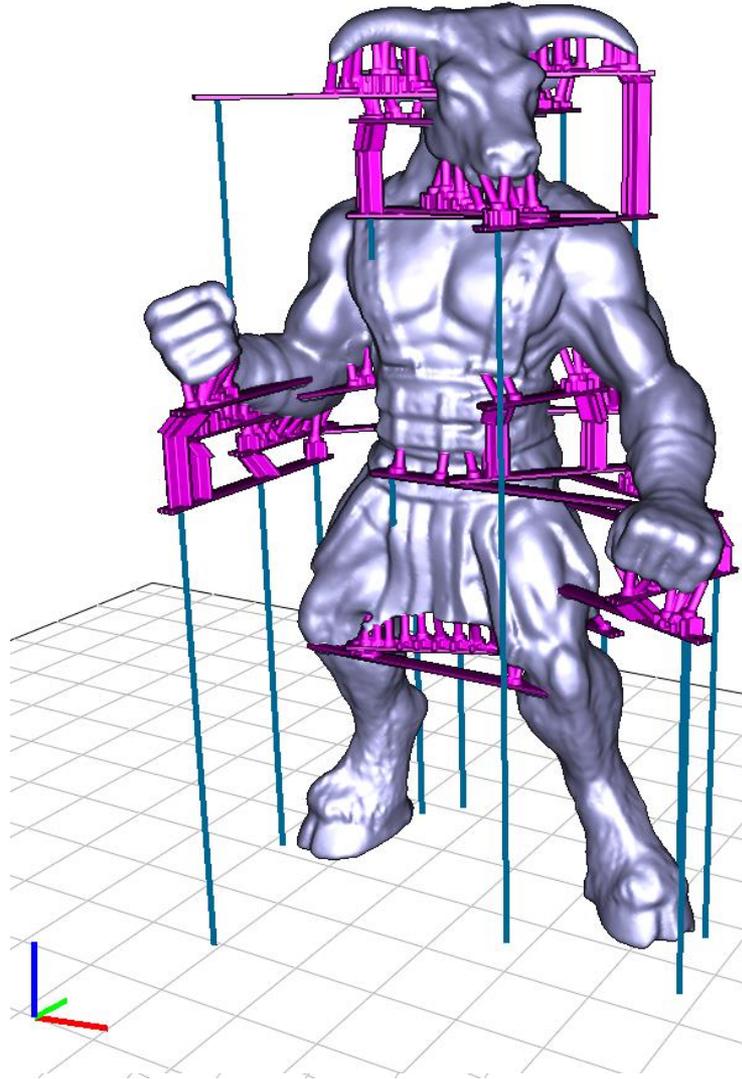
Exemple



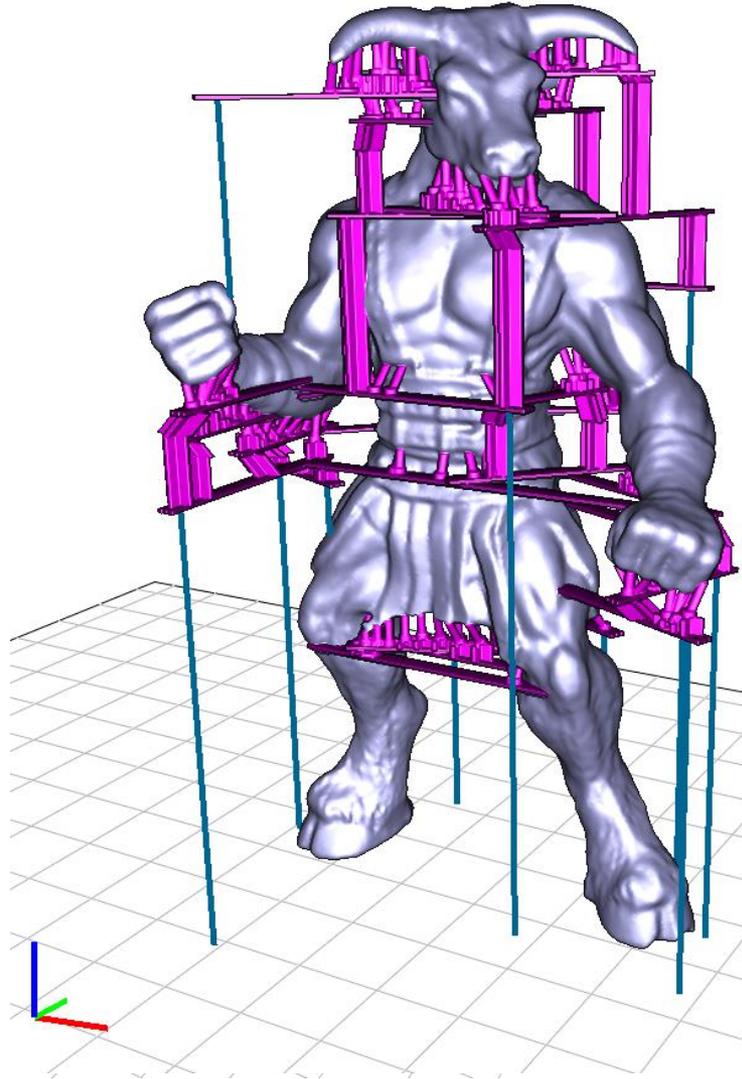
Exemple



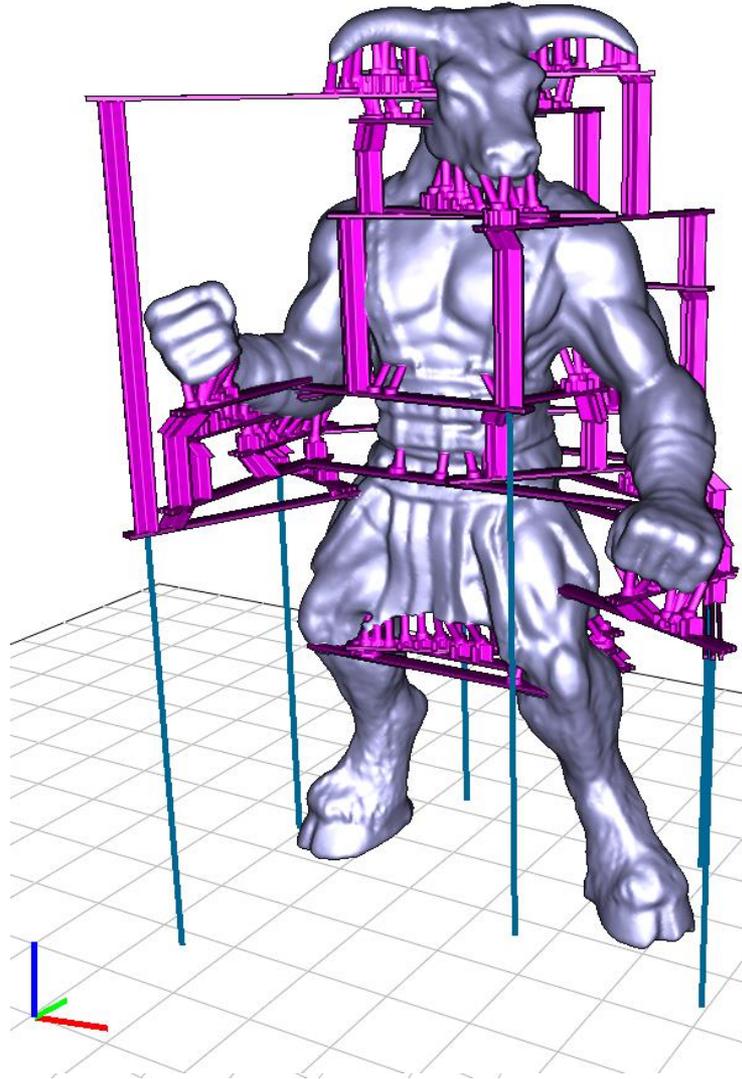
Exemple



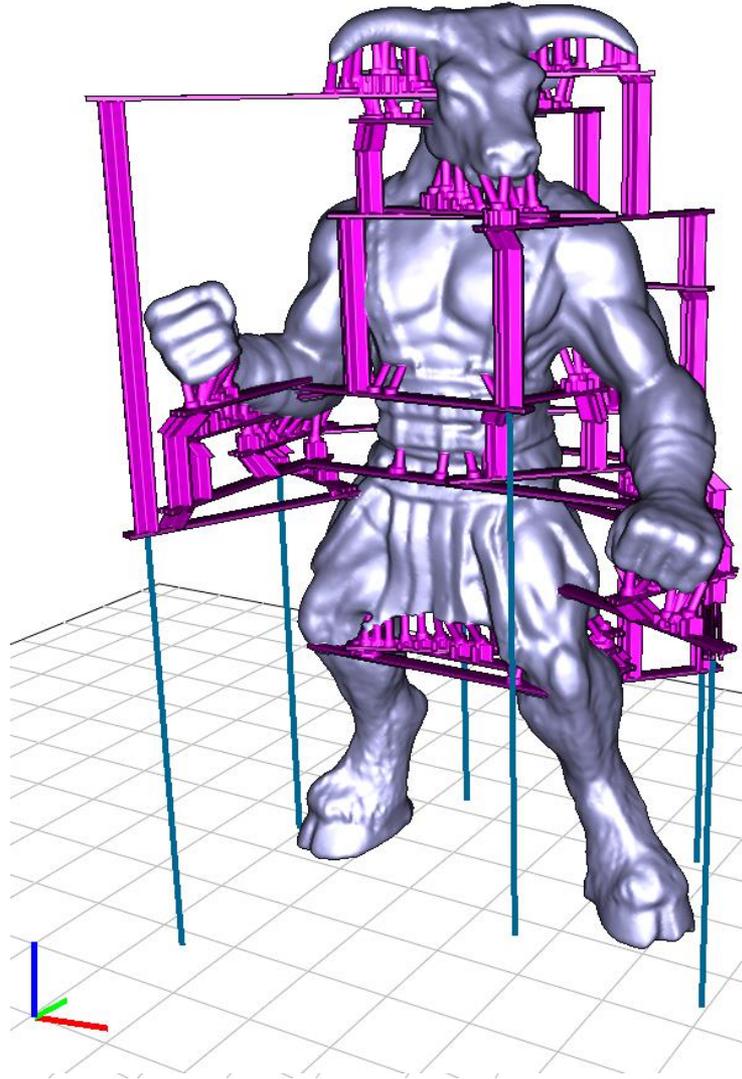
Exemple



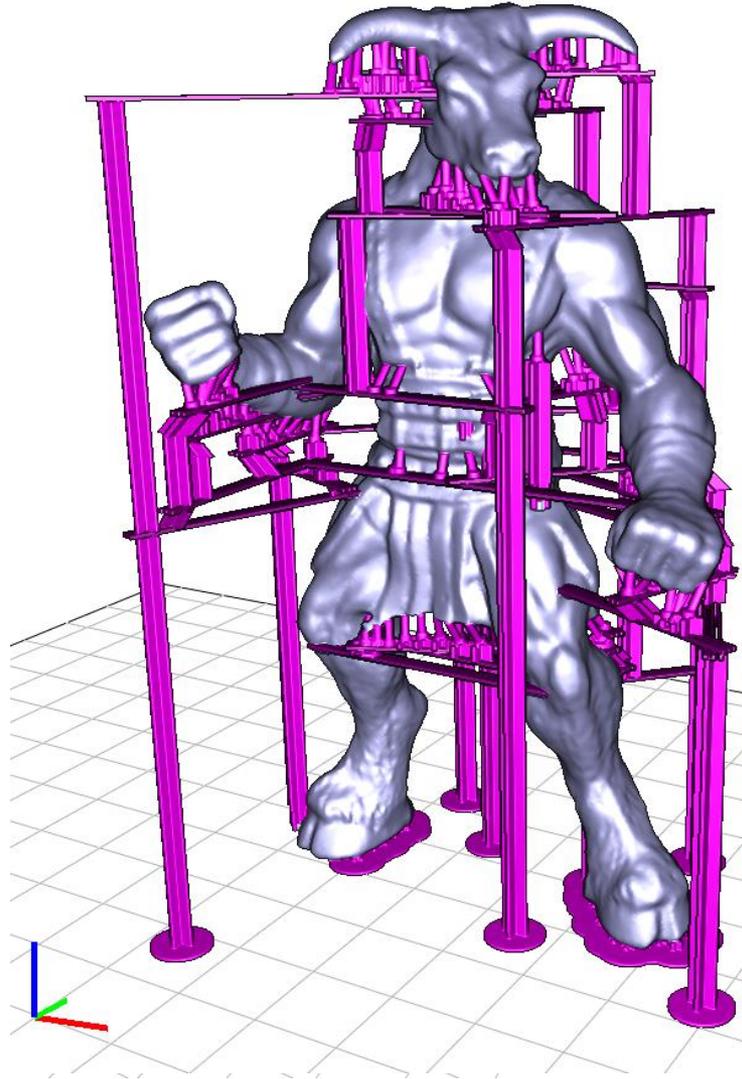
Exemple



Exemple



Exemple



Résultats – Minotaure

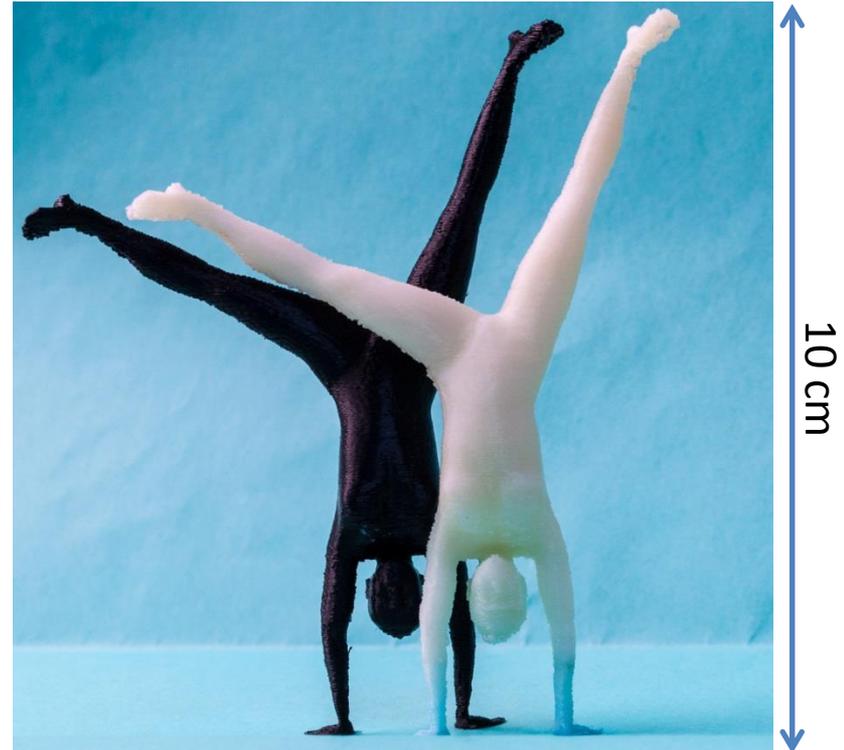


[thing:46646](#)

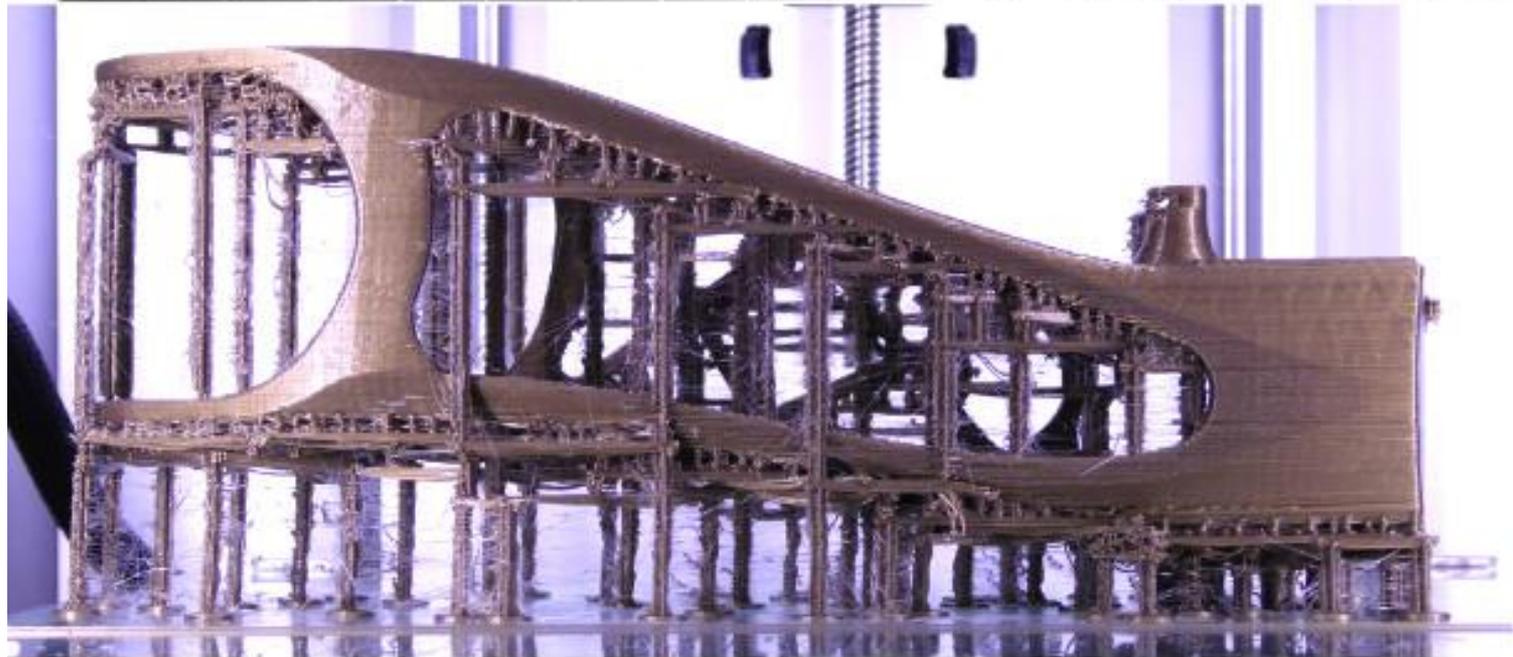
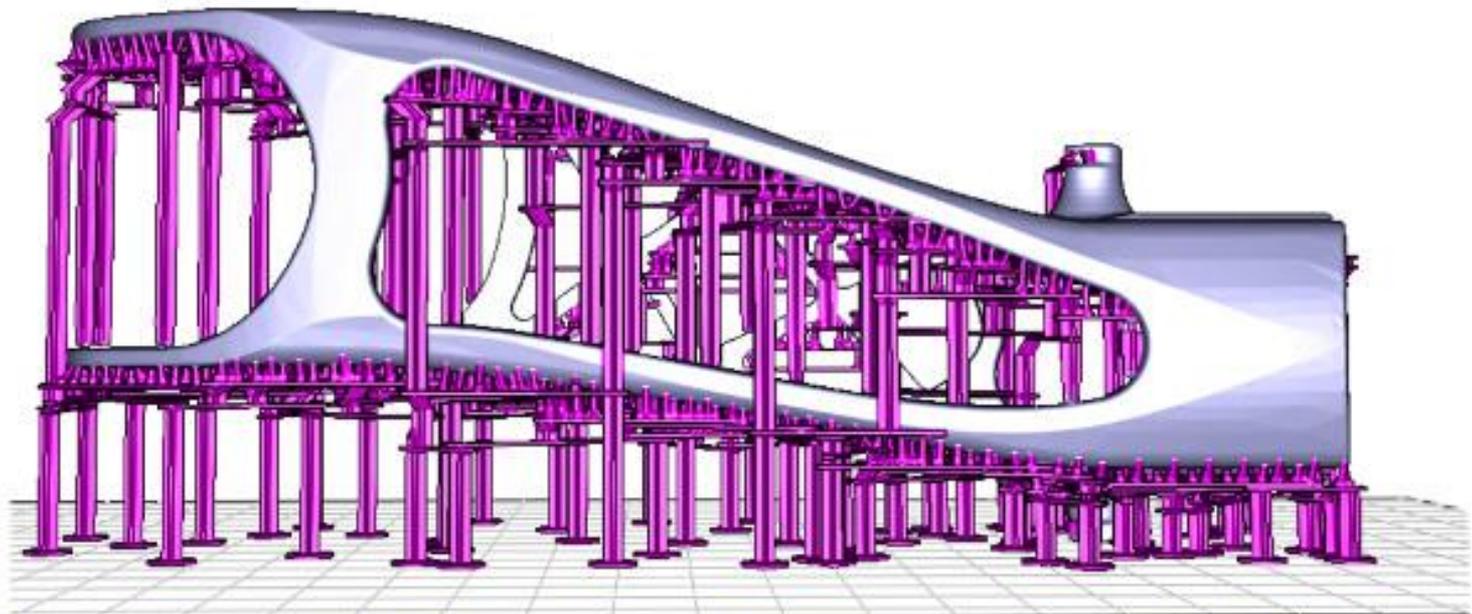


10 cm

Résultats – Gymnast

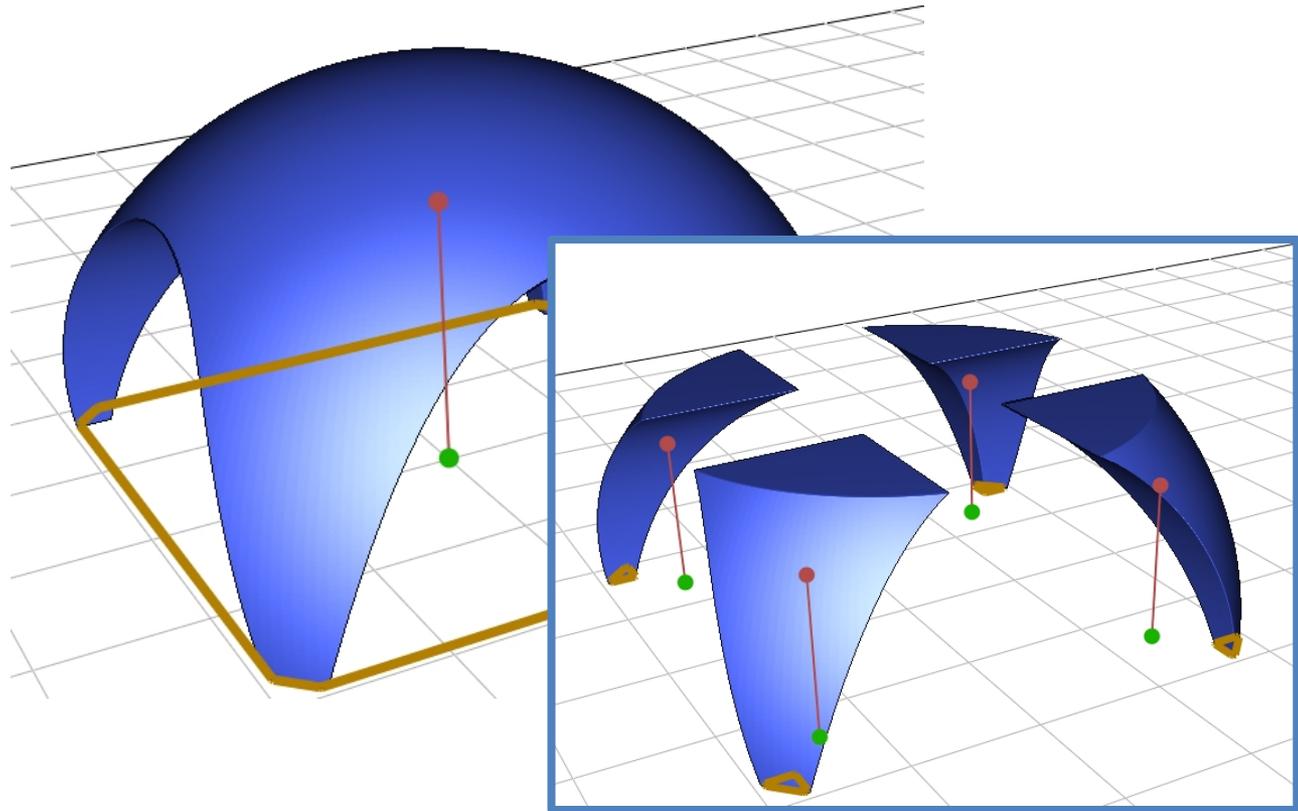


<http://www.123dapp.com/123C-3D-Model/Female-Gymnastics-Cartwheel/711240>



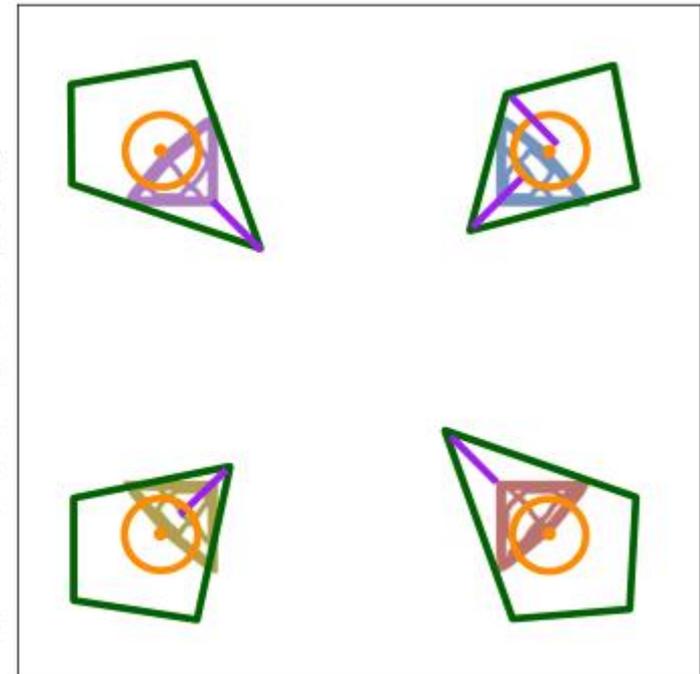
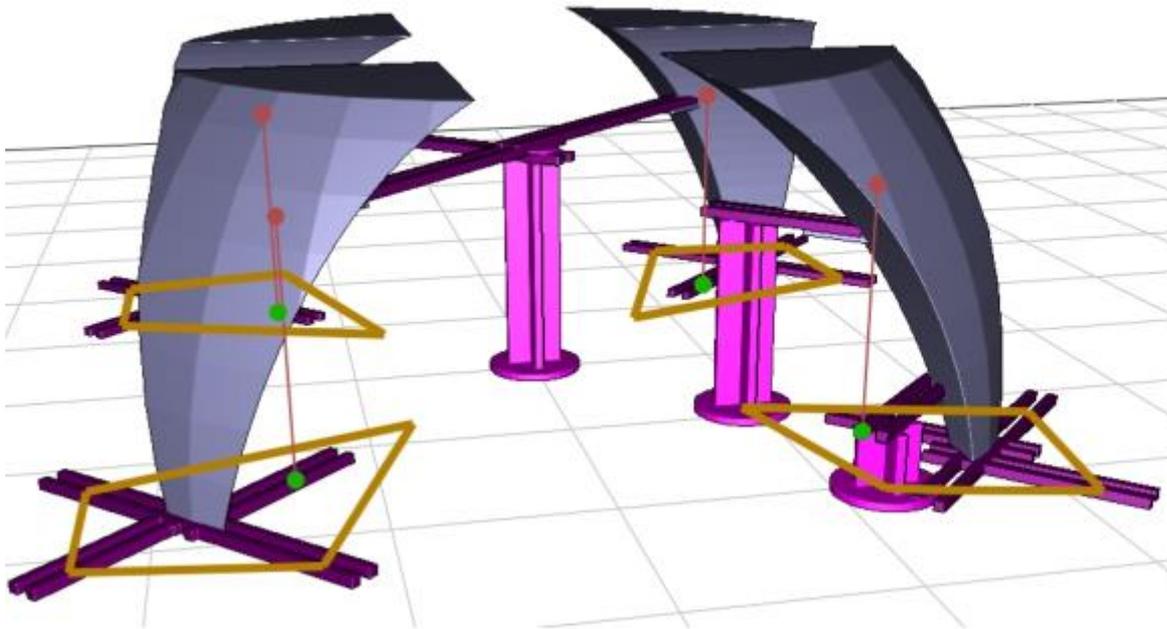


Equilibrage pendant l'impression



Détection

- Centre de masse hors de la base de support



Remerciements

- Etudiants et collaborateurs
- ERC ShapeForge (StG-2012-307877)
- Région Lorraine

Questions?

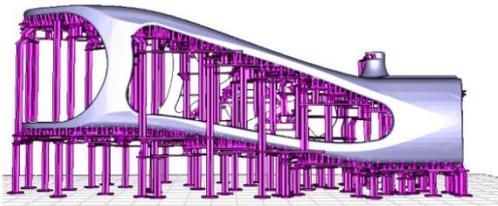


Make it stand

R. Prévost¹, E. Whiting¹, S. Lefebvre², O. Sorkine¹

Transactions on Graphics 2013

(1) ETH Zurich, (2) Inria



Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing

J. Dumas, J. Hergel, S. Lefebvre

Transactions on Graphics 2014

