

# Simulation et contrôle de phénomènes physiques

Pierre-Luc Manteaux

3 Octobre 2016

Sous la direction de François Faure et Marie-Paule Cani

Université Grenoble-Alpes, CNRS (LJK) and Inria



# Contexte : L'informatique graphique

Créer-Interagir avec des environnements virtuels



*Blanche neige et les 7 nains, Walt Disney, 1937*



*Luxo Jr., Pixar, 1986*

Gain de temps considérable - Absence de limites

# Contexte : Simulation physique

**Simuler-Visualiser-Interagir** avec des phénomènes réalistes

Divertissement

Jeux vidéos



*NVIDIA*

Enseignement

Chirurgie virtuelle



*Insimo*

Fabrication

Design



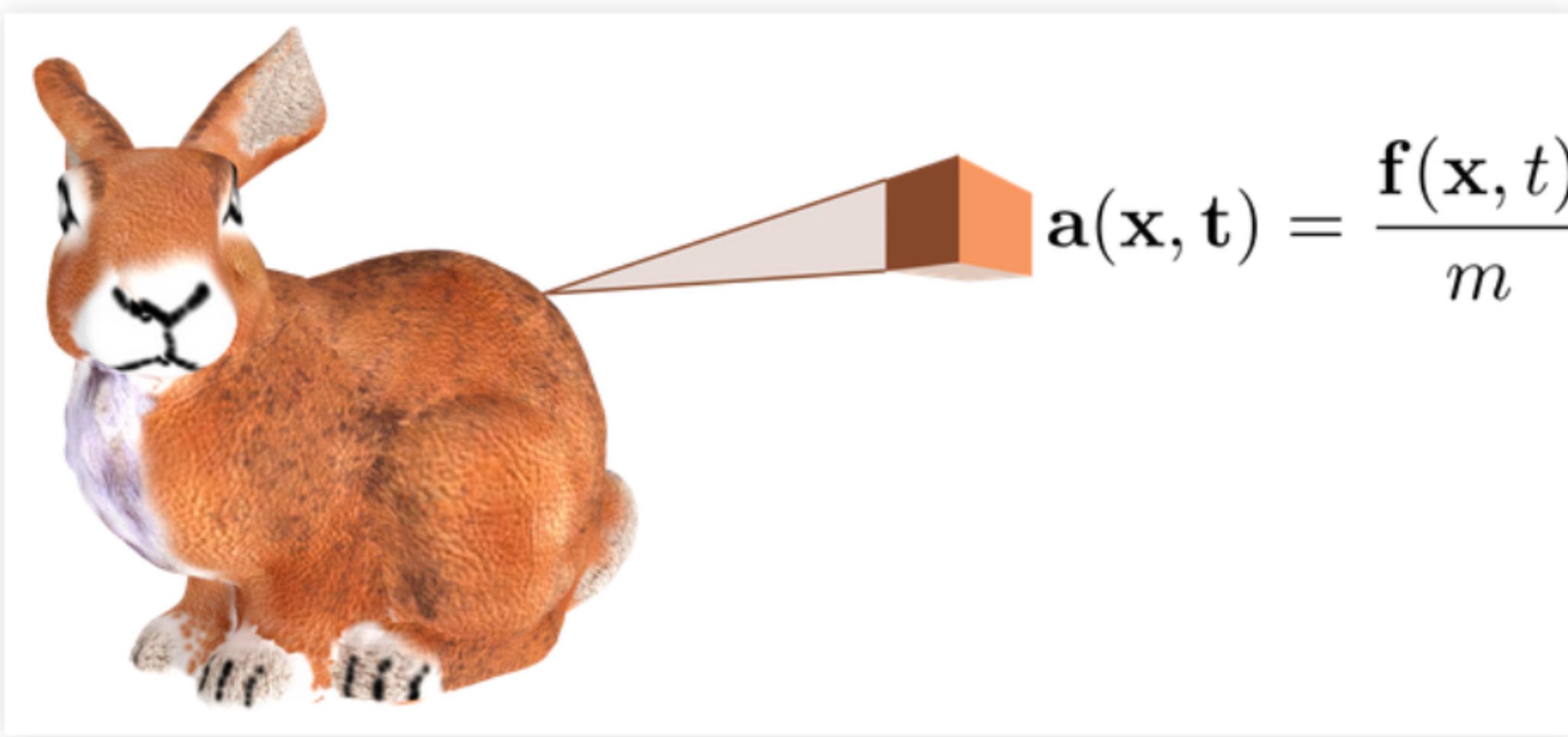
*Frank Gehry*

Immersion

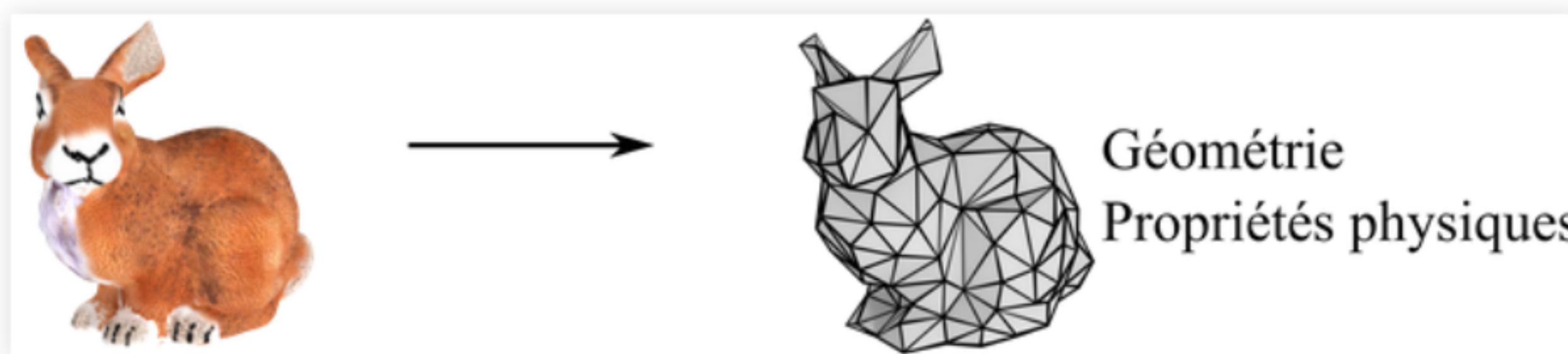
Conception + rapide

# Contexte : Simulation physique

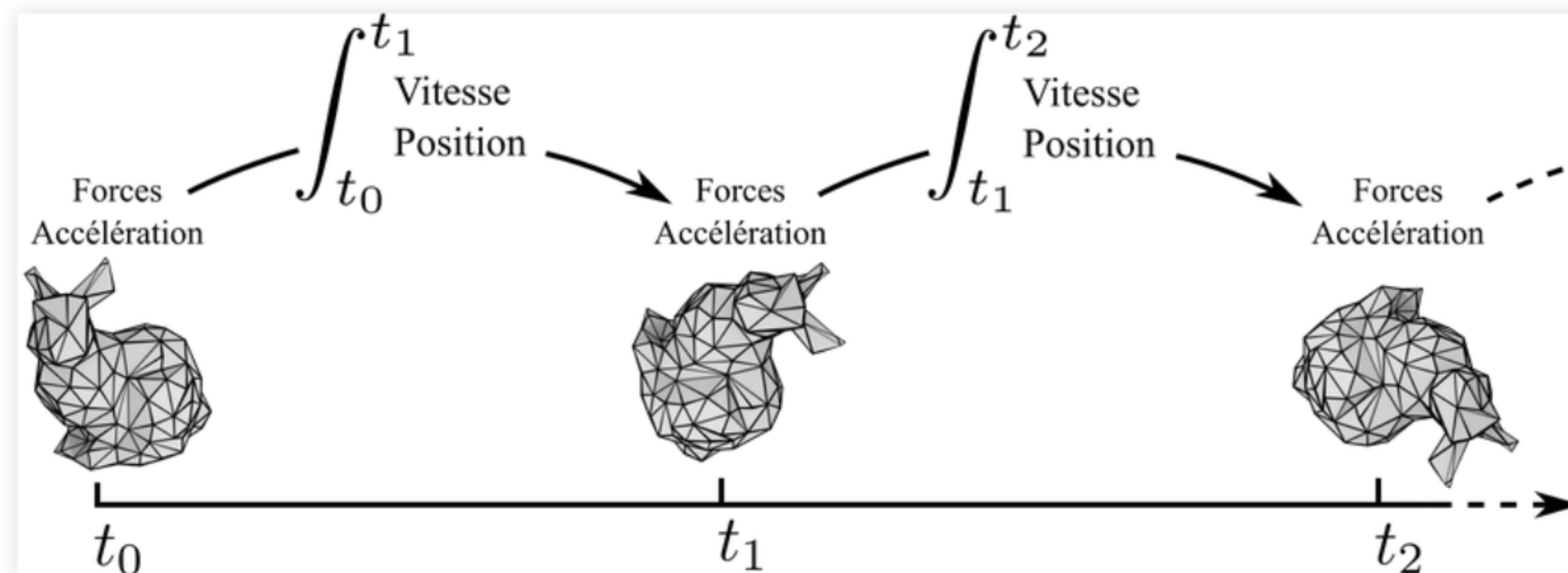
Approximer le comportement d'un objet



# Contexte : Simulation physique



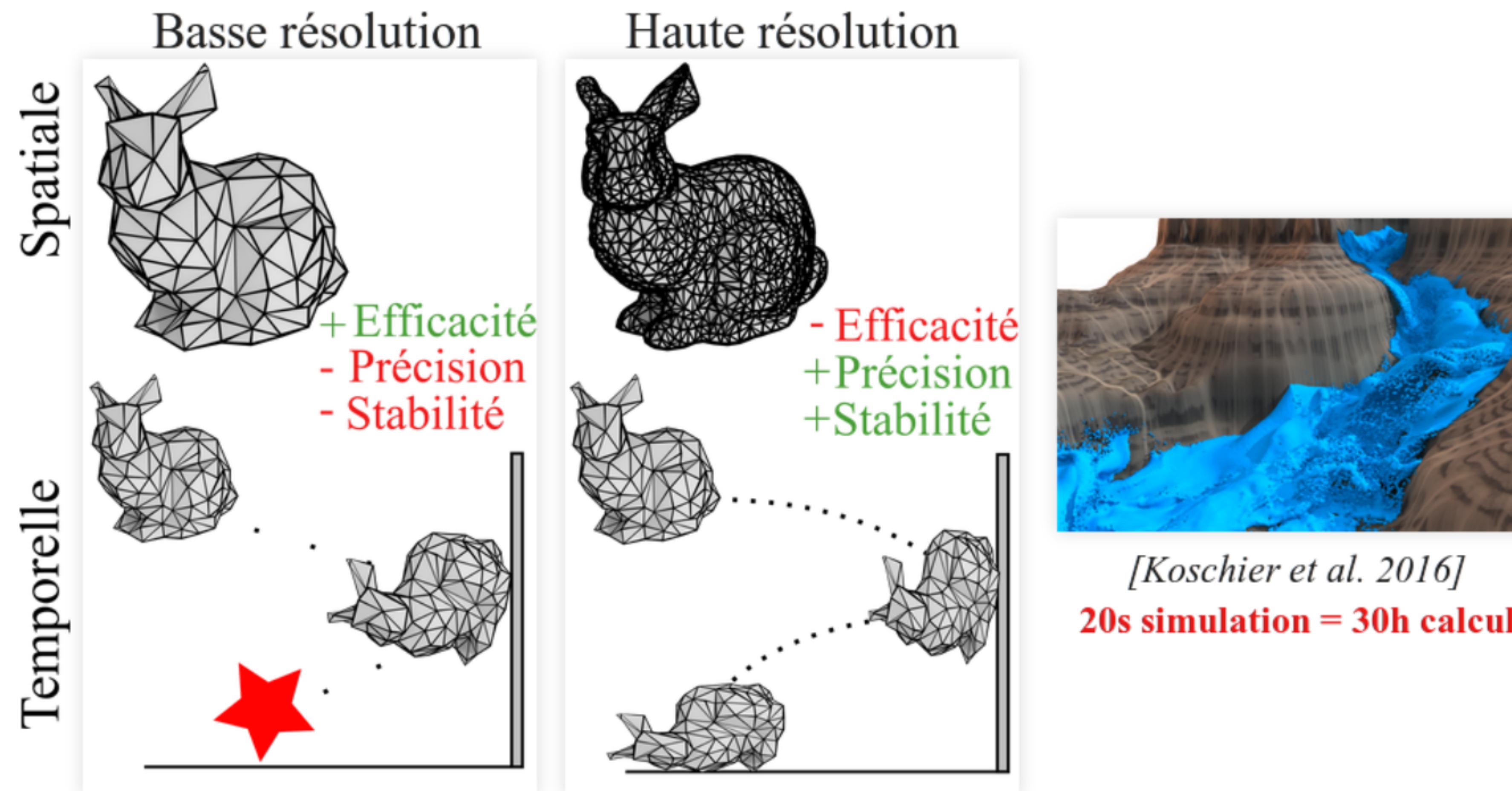
## Discrétisation spatiale



## Discrétisation temporelle

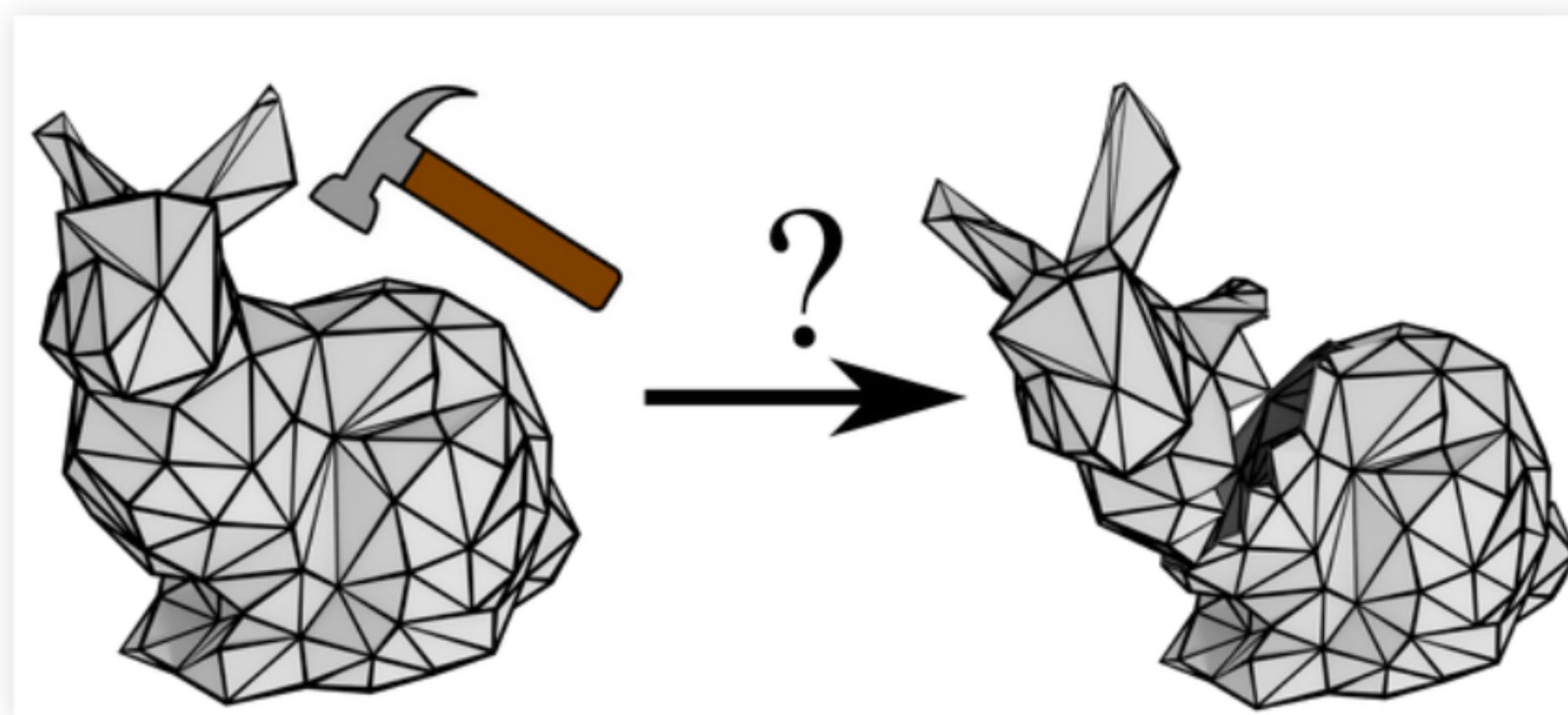
# Défis en simulation physique

## Complexité calculatoire



# Défis en simulation physique

Modélisation efficace de changements topologiques



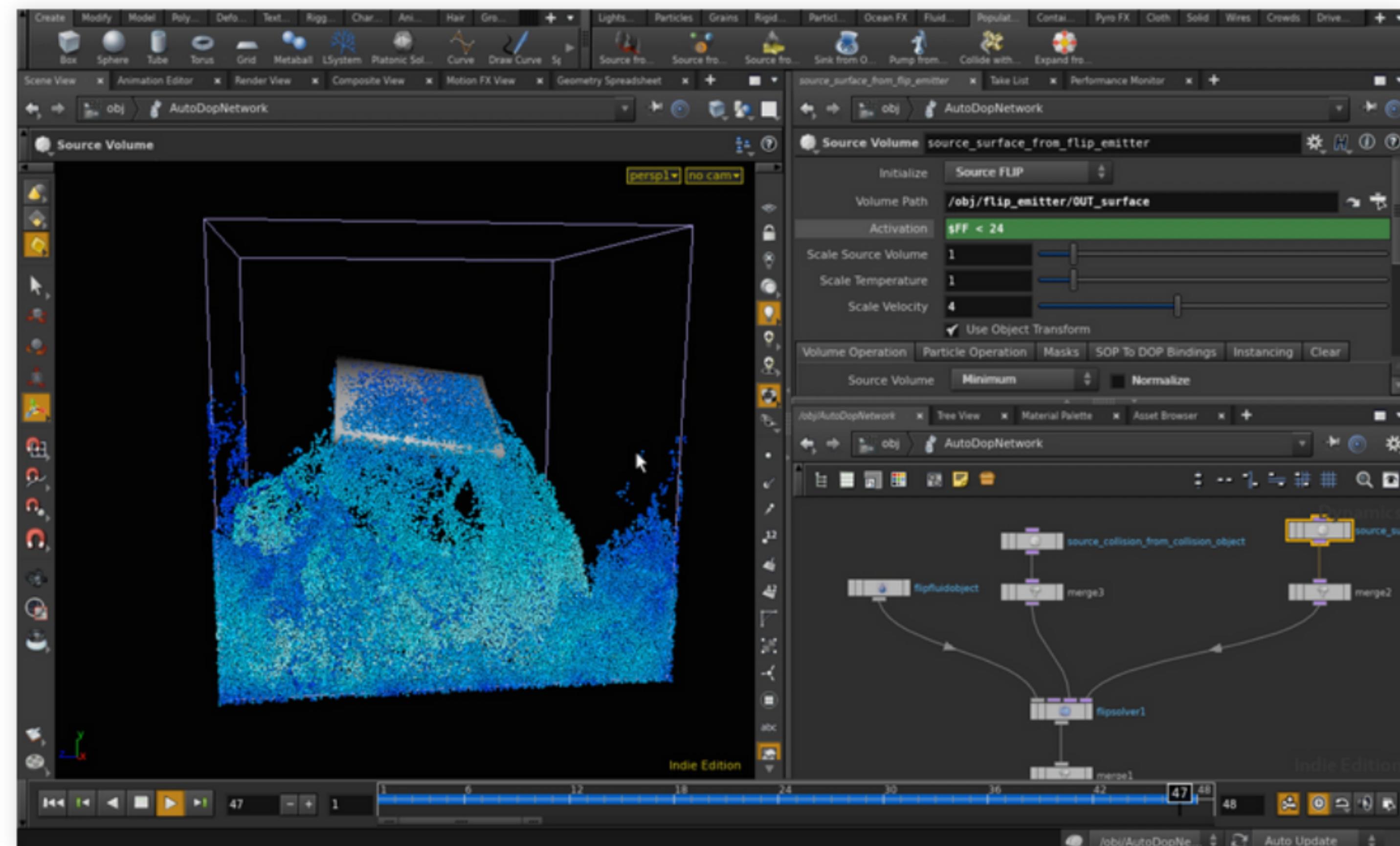
[Pfaff et al. 2014]

**2s simulation = 1h calcul**

**Peu présent dans un contexte interactif**

# Défis en simulation physique

## Contrôle intuitif

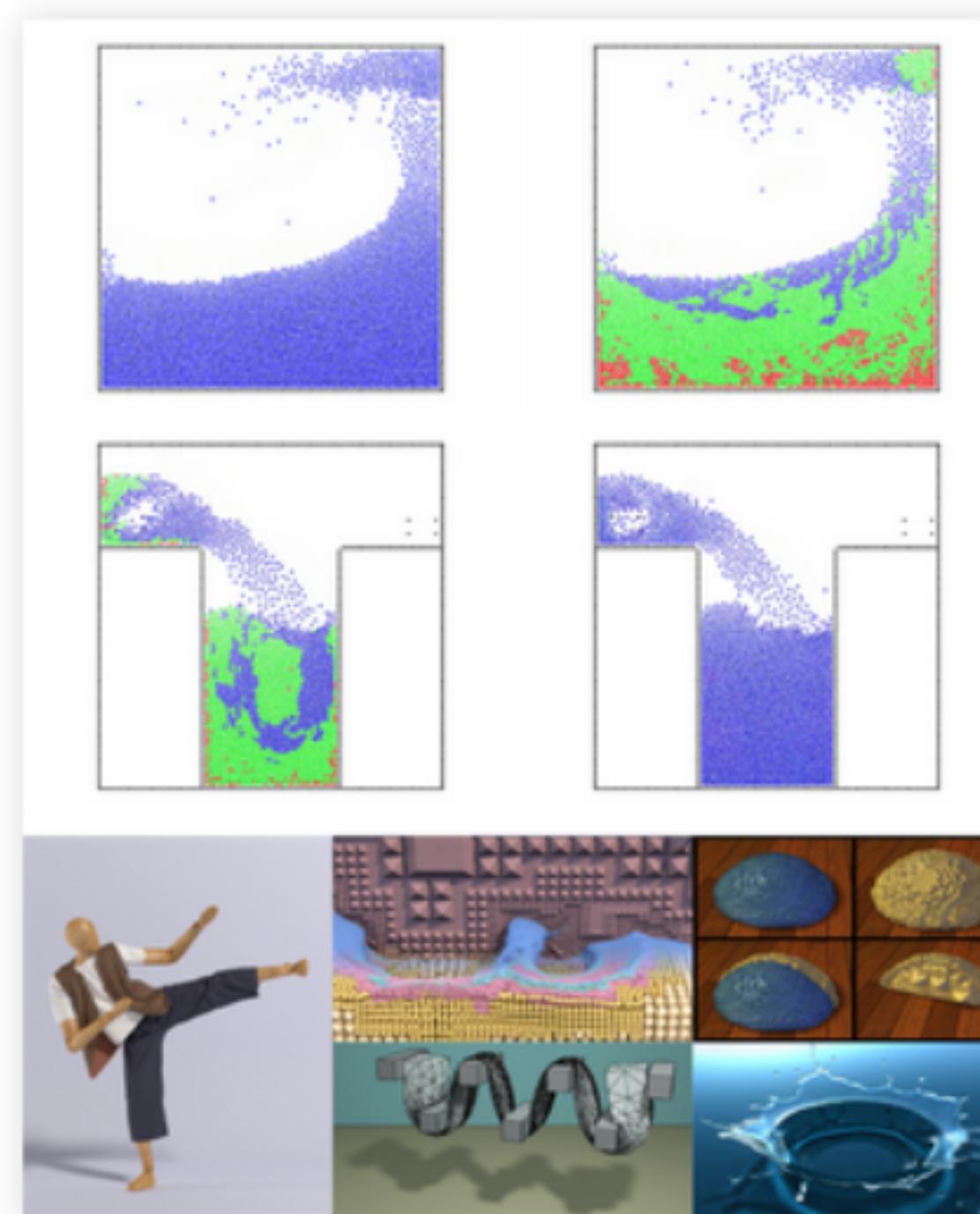


[Houdini, DreamWorks] **Interface peu intuitive, contrôle indirect, temps de calcul long**

# Contributions de cette thèse

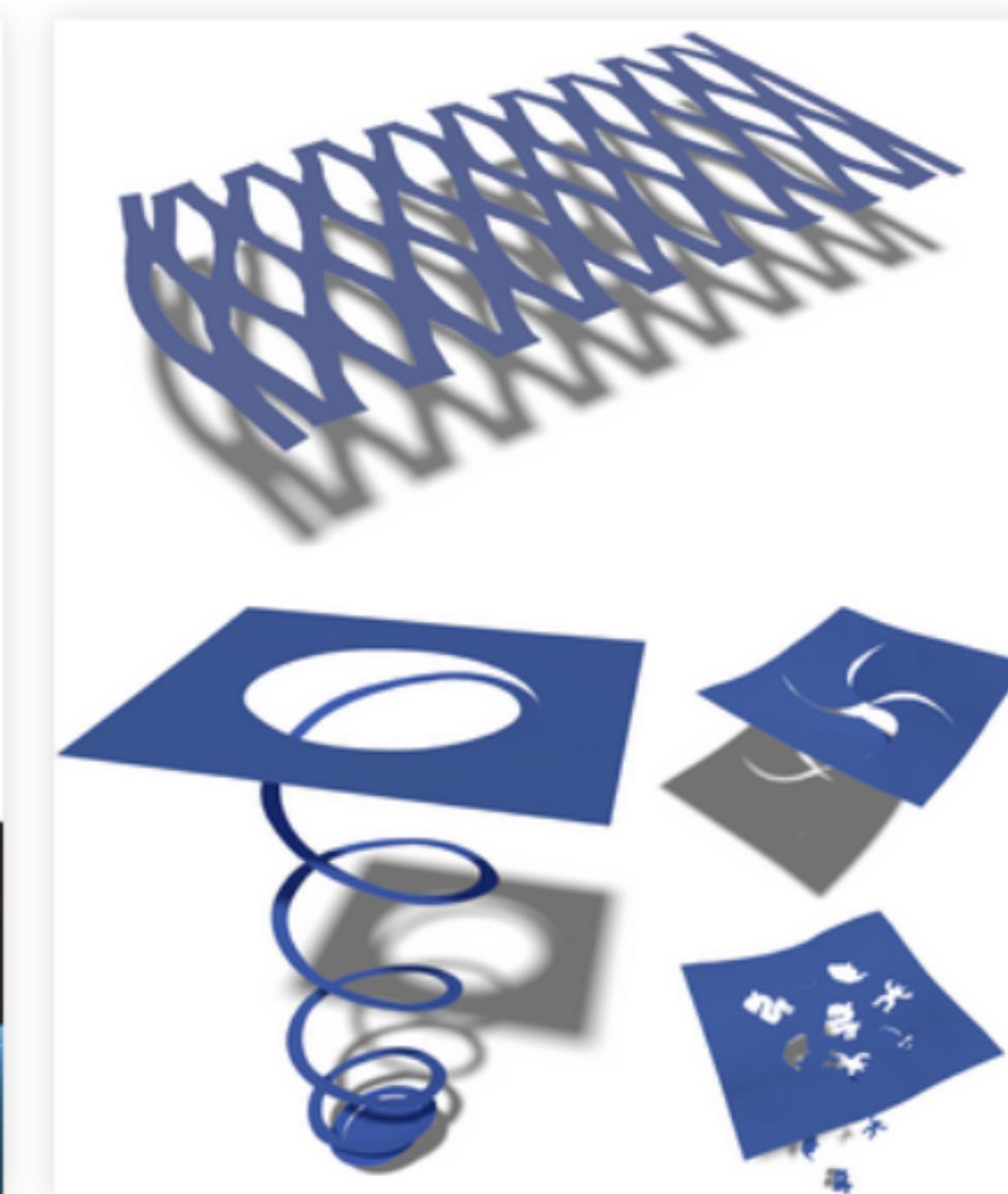
Complexité calculatoire

Modèle adaptatif



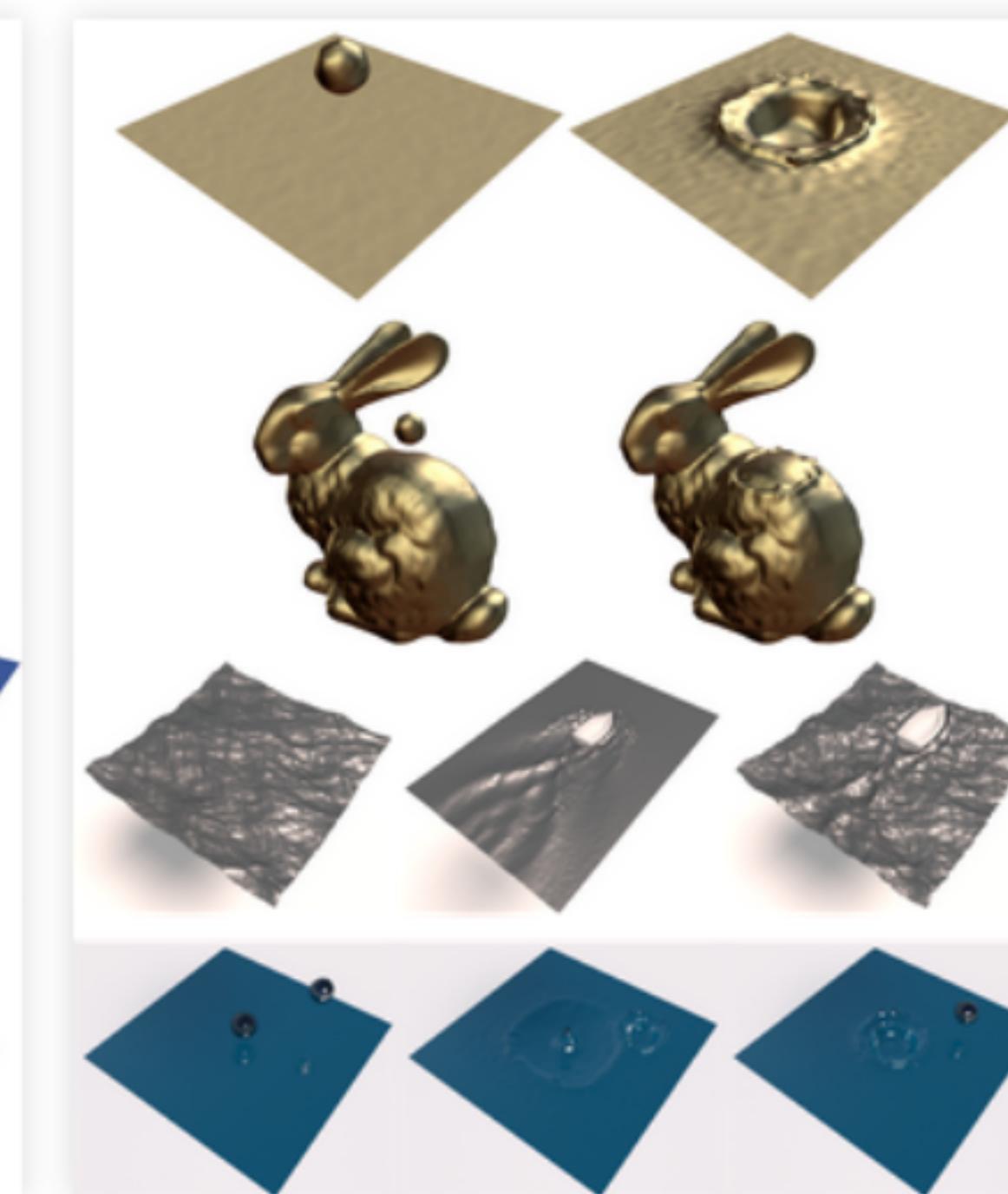
Changements  
topologiques

Découpe interactive



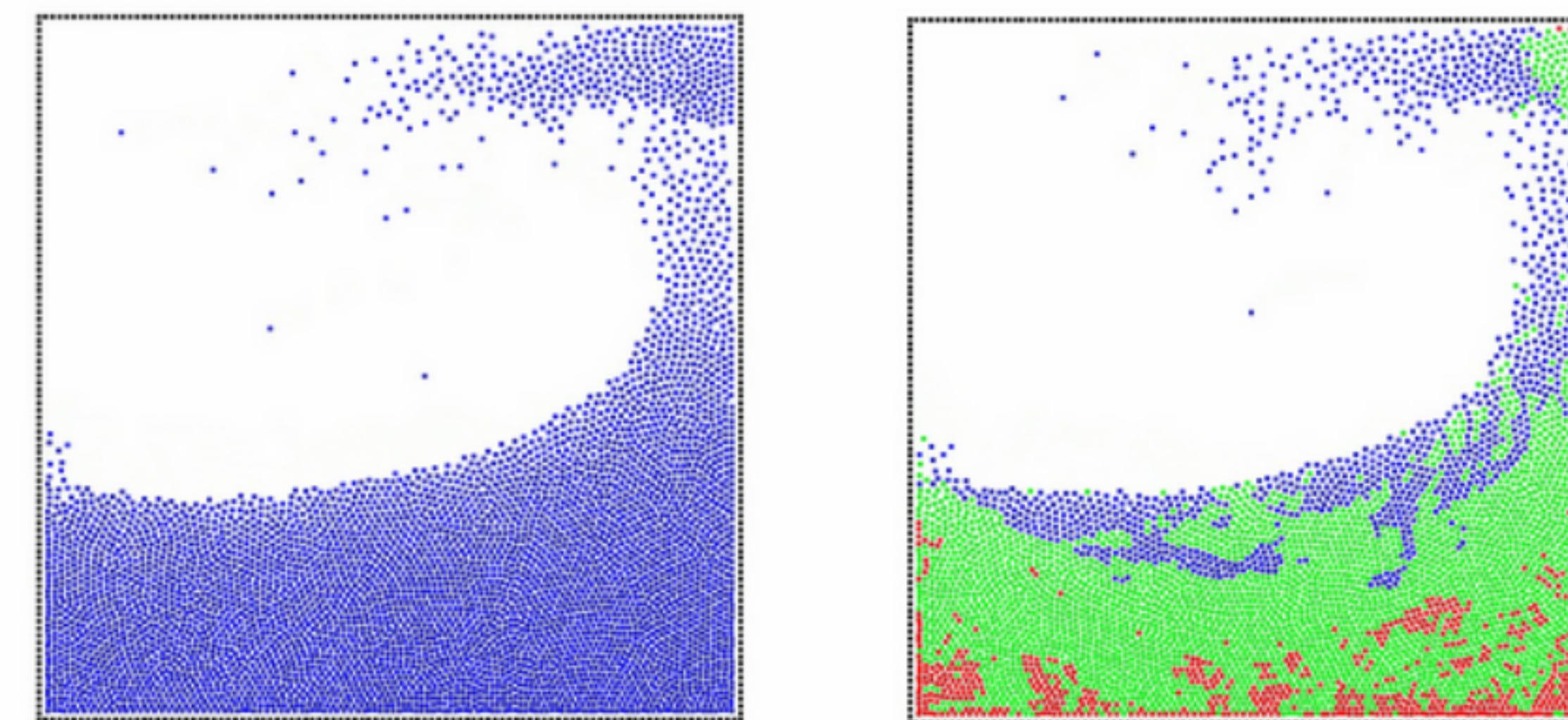
Contrôle intuitif

Sculpture d'animation



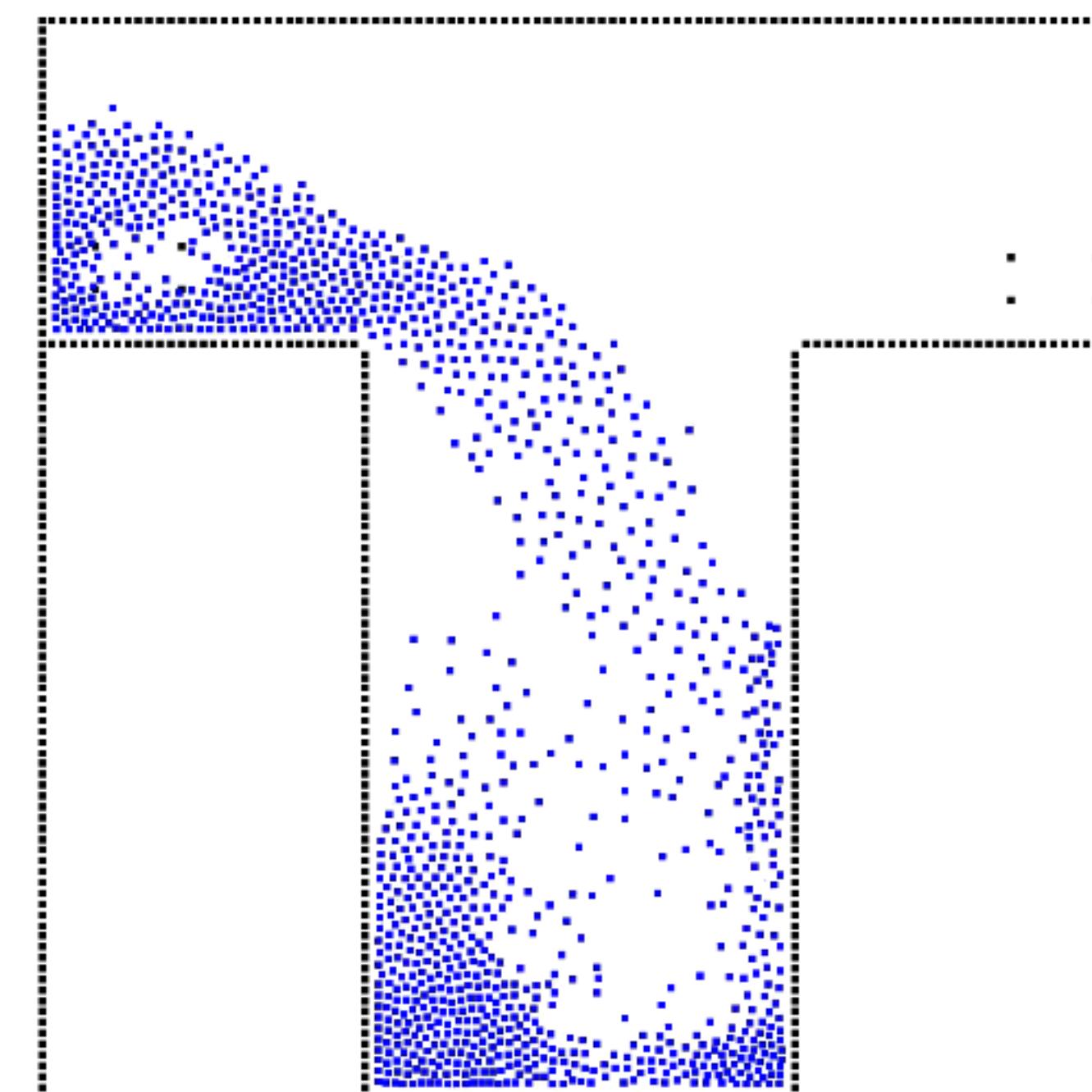
# Adaptativité des modèles physiques

## Extension de l'ARPS à l'informatique graphique



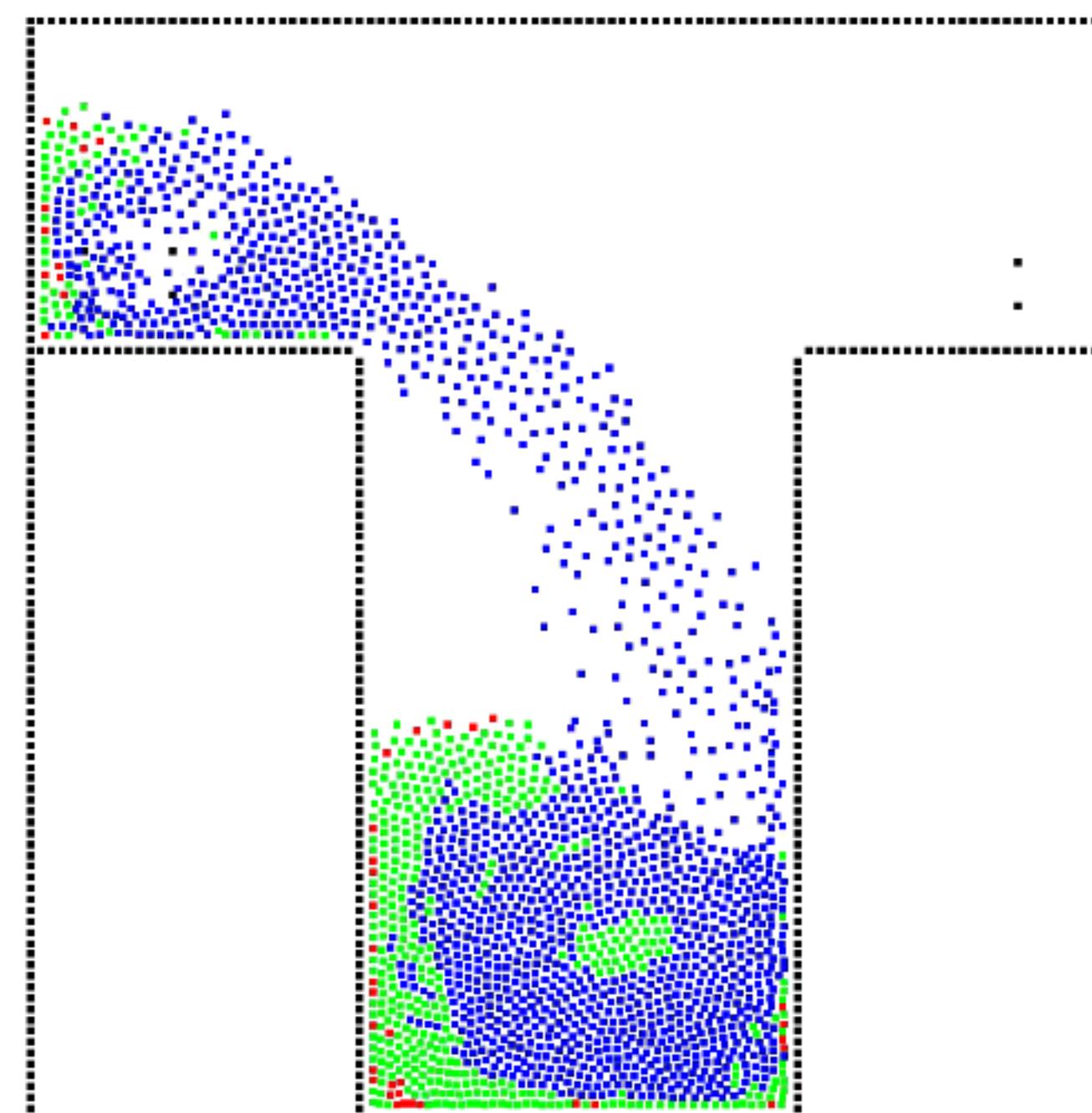
# Motivations

Tant de calcul pour si peu de mouvement



# Notre approche

Concentrer les calculs dans les zones *dynamiques*



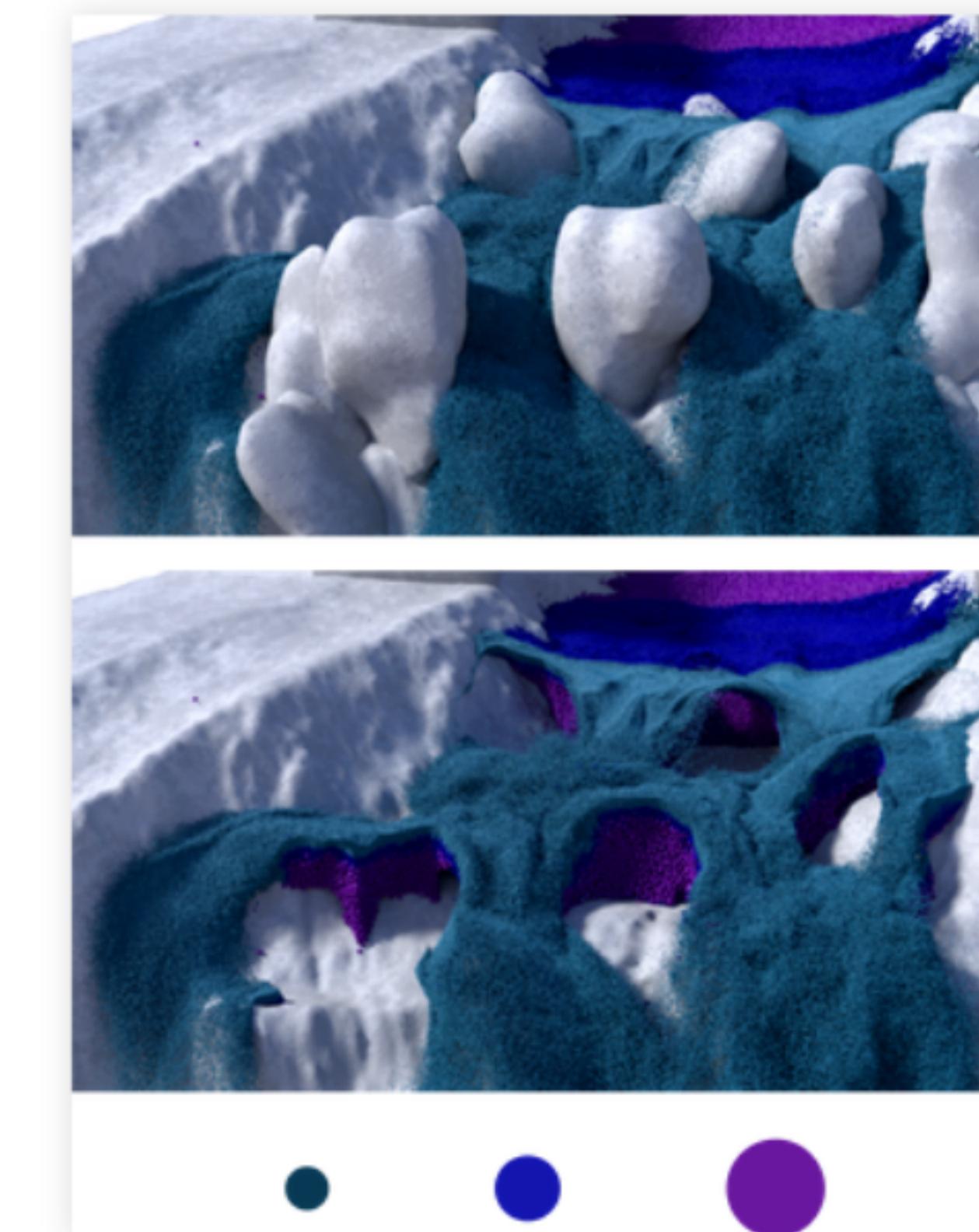
2.7x plus rapide

# État de l'art : Modèles adaptatifs

Mise à jour **dynamique** des modèles  
pour le meilleur compromis **précision/performance/stabilité**

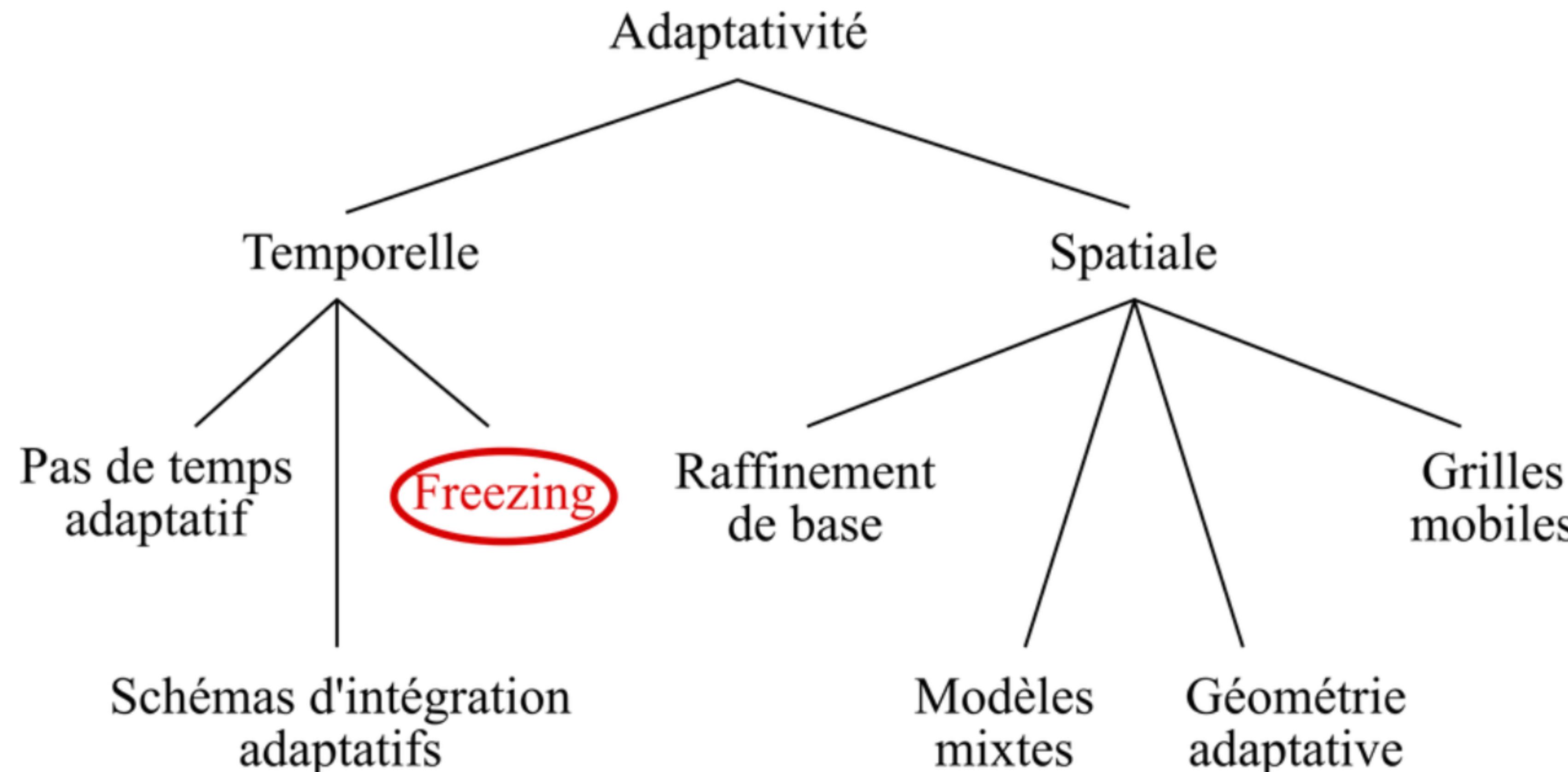


[Narain et al. 2012] Déformation



[Horvath et al. 2013] Distance surface / caméra

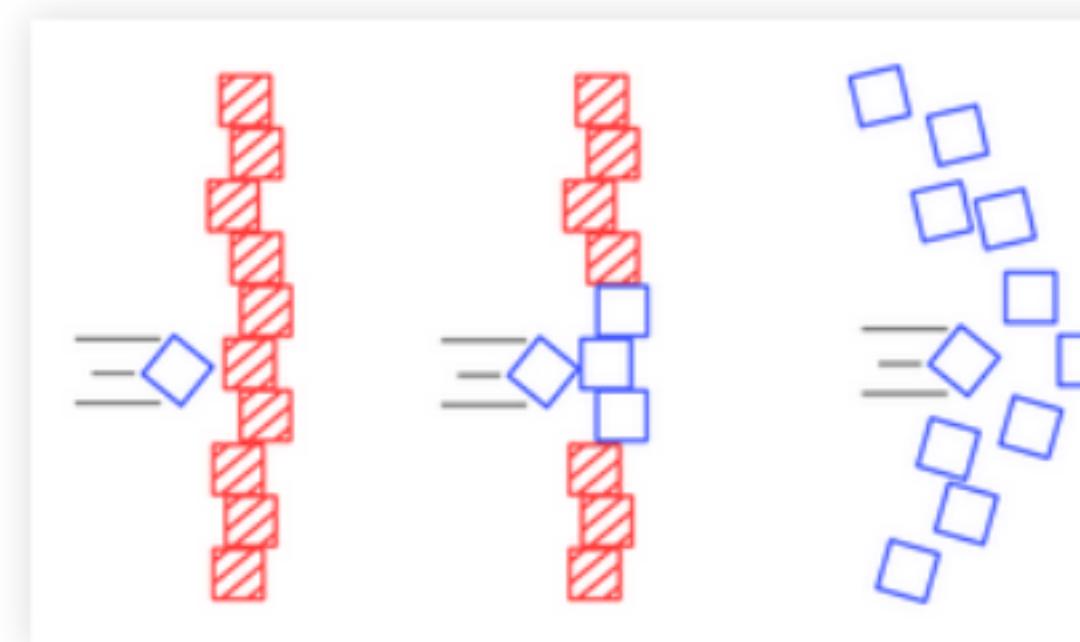
# État de l'art : Modèles adaptatifs



# État de l'art: Freezing

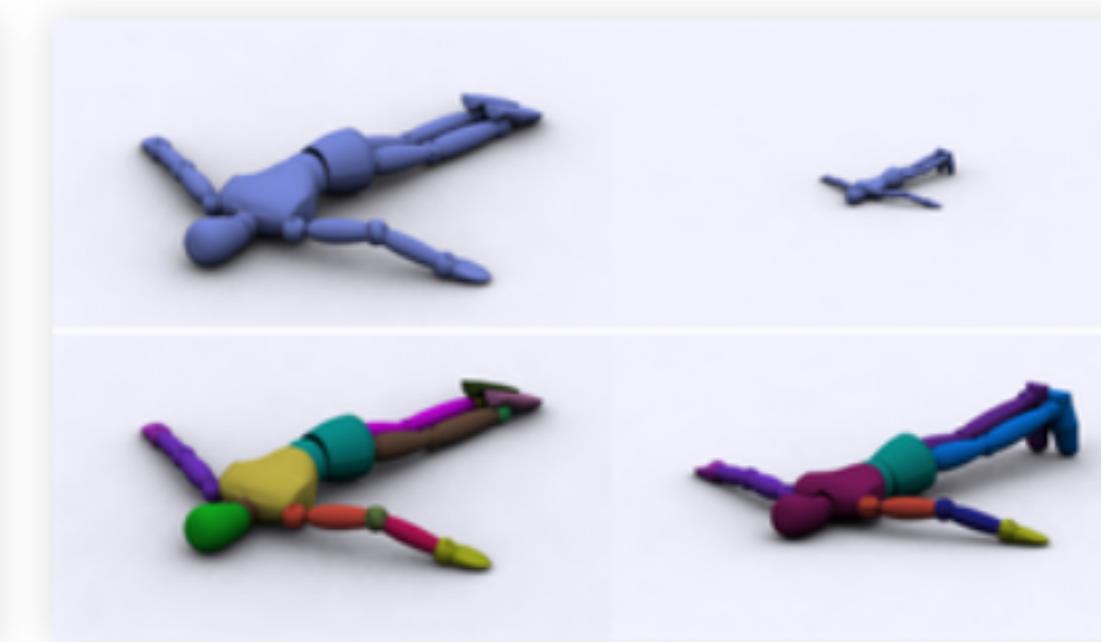
Gagner du temps dans les situations quasi-statiques

Objets Rigides



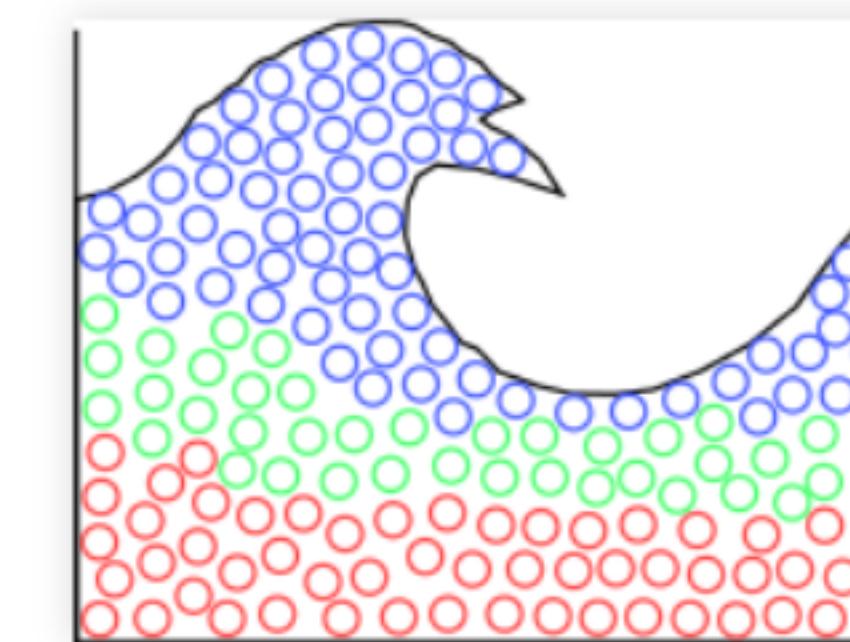
[Schmidl et al. 2002]  
[Guendelman et al. 2003]

Rigides Articulés



[Kim et al. 2008]

Liquides



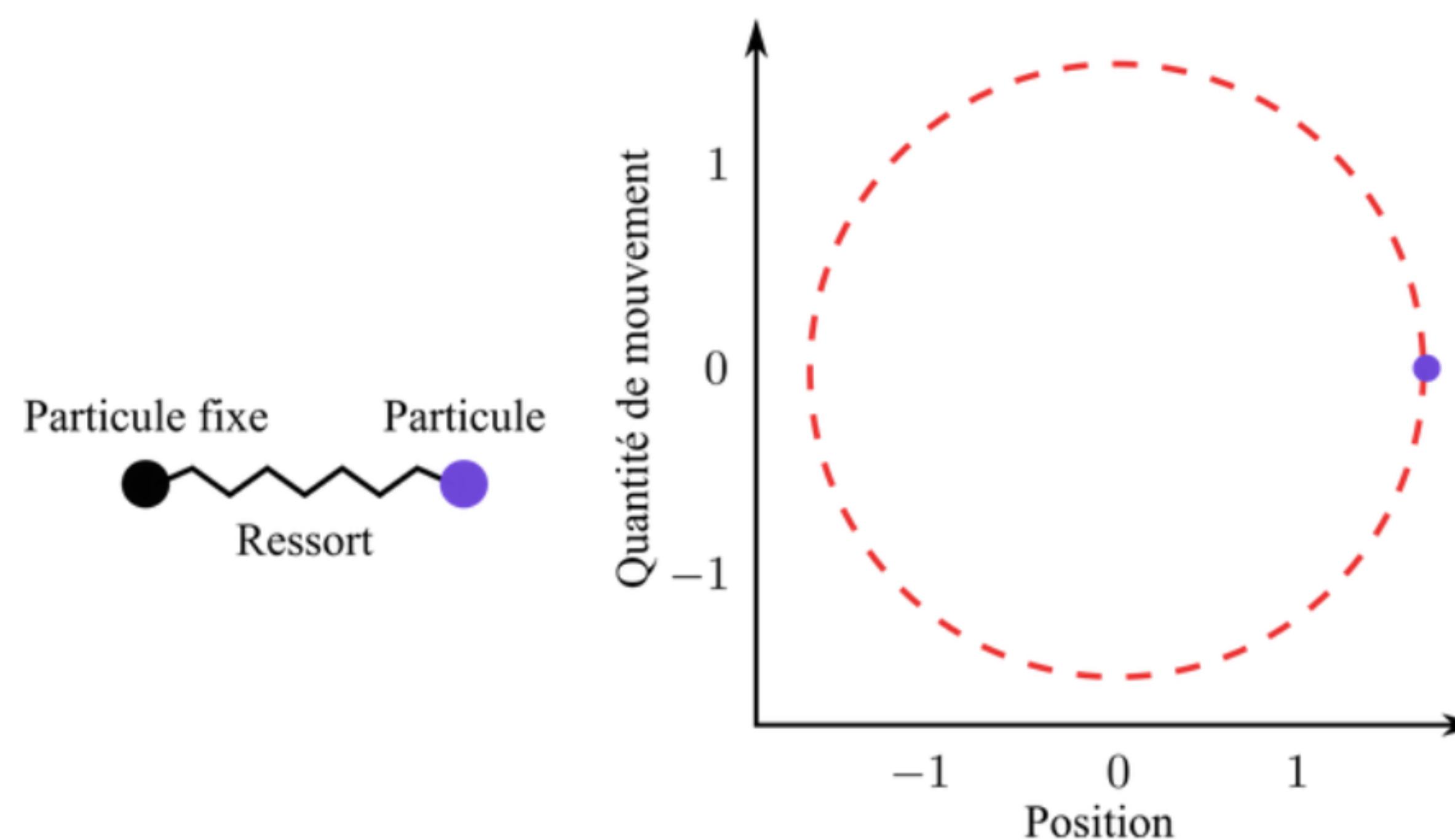
[Goswami et al. 2011]

**Nombre constant de degrés de liberté**

**Défi : Réactiver de manière cohérente une simulation**

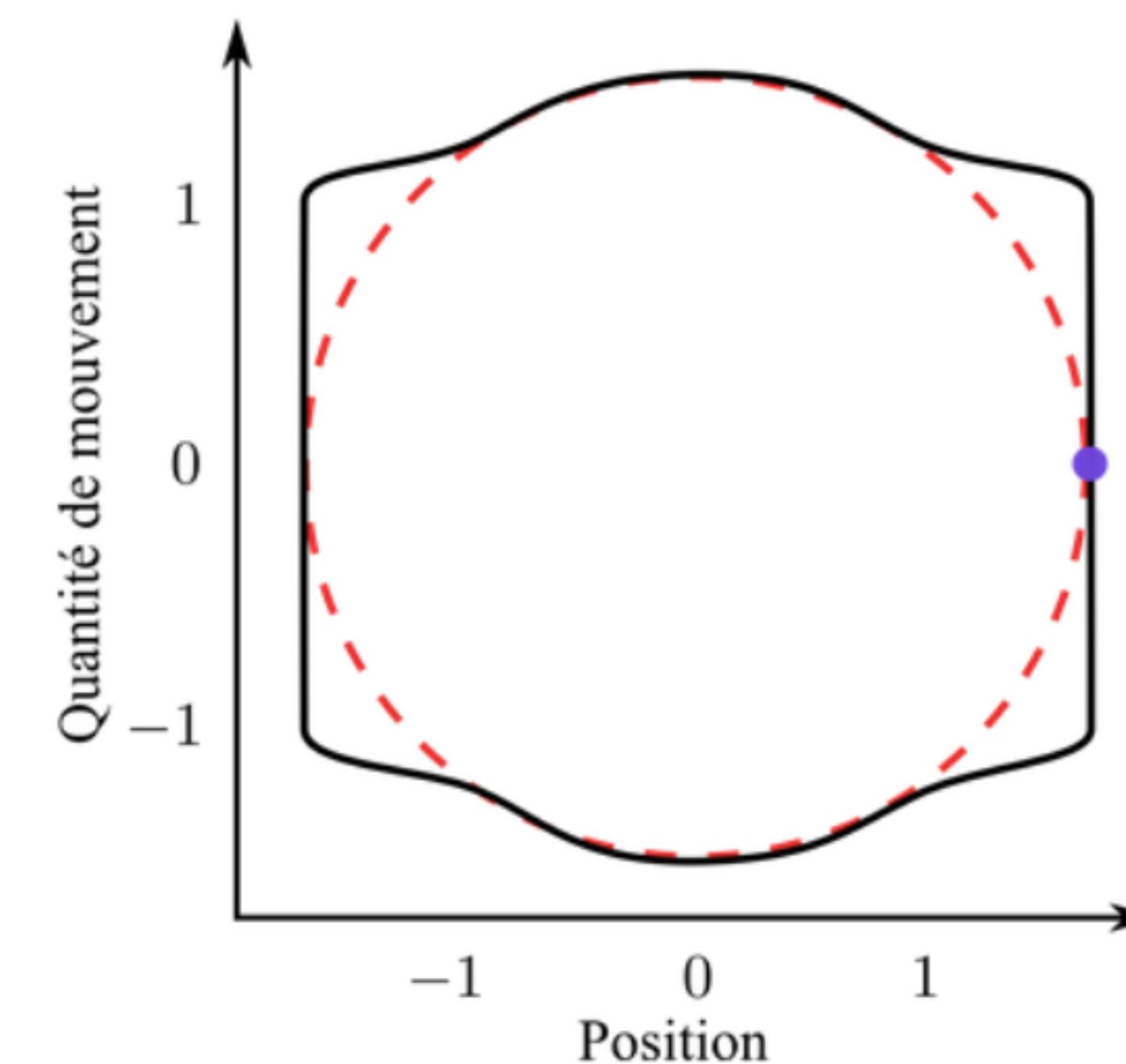
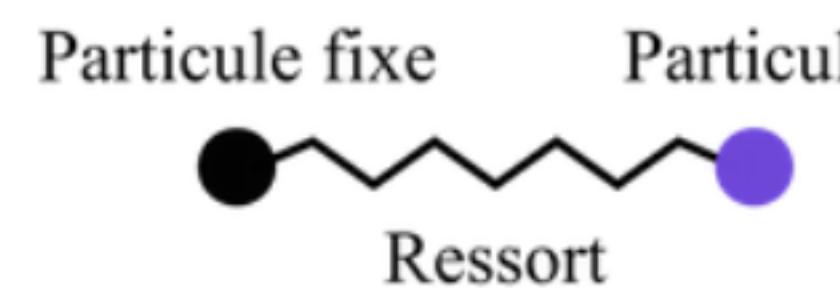
# Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

Issu de la Dynamique Moléculaire, [Artemova & Redon 2012]



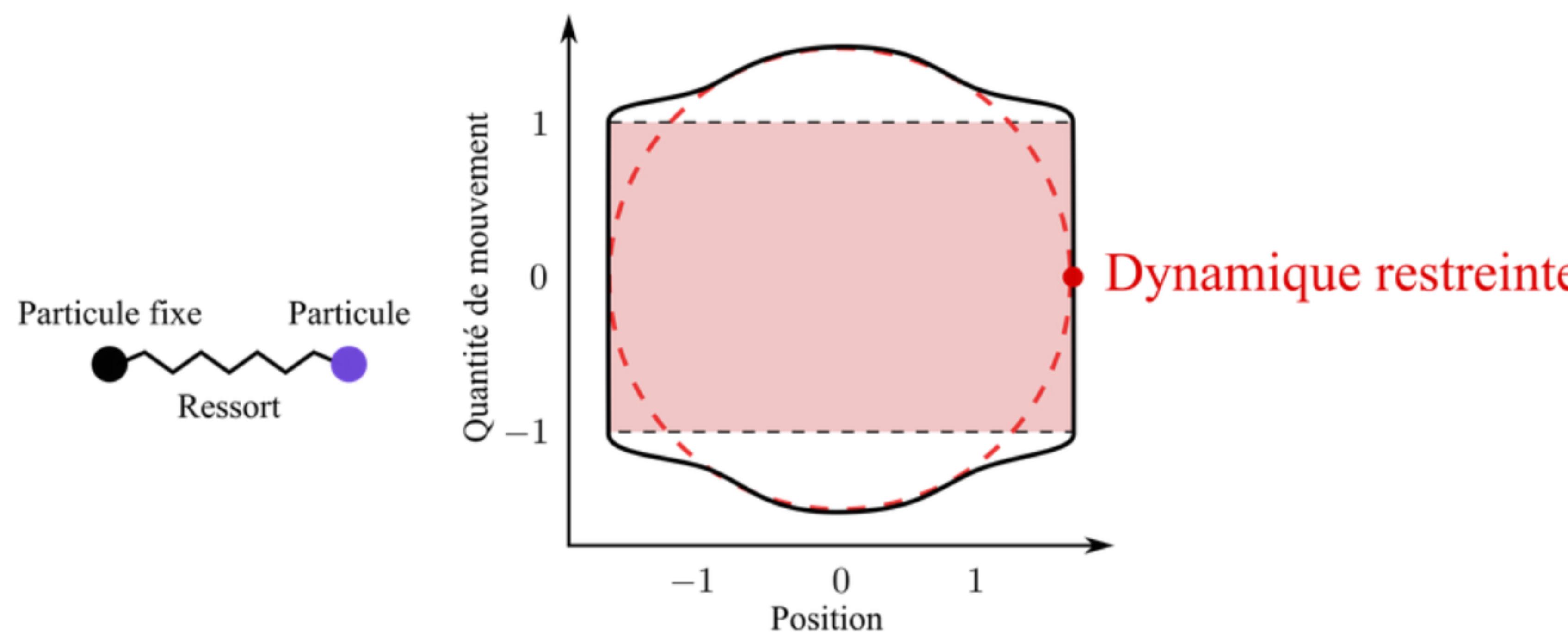
# Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

Issu de la Dynamique Moléculaire, [Artemova & Redon 2012]



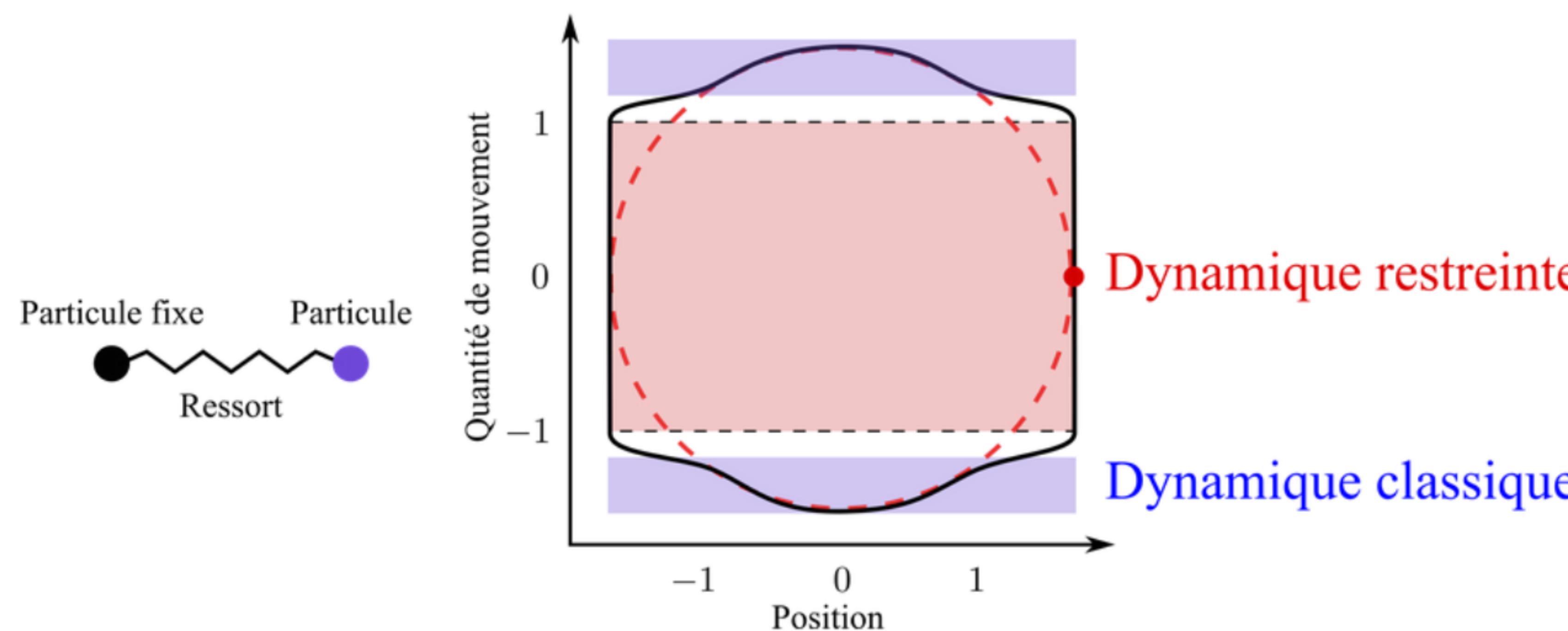
# Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

Issu de la Dynamique Moléculaire, [Artemova & Redon 2012]



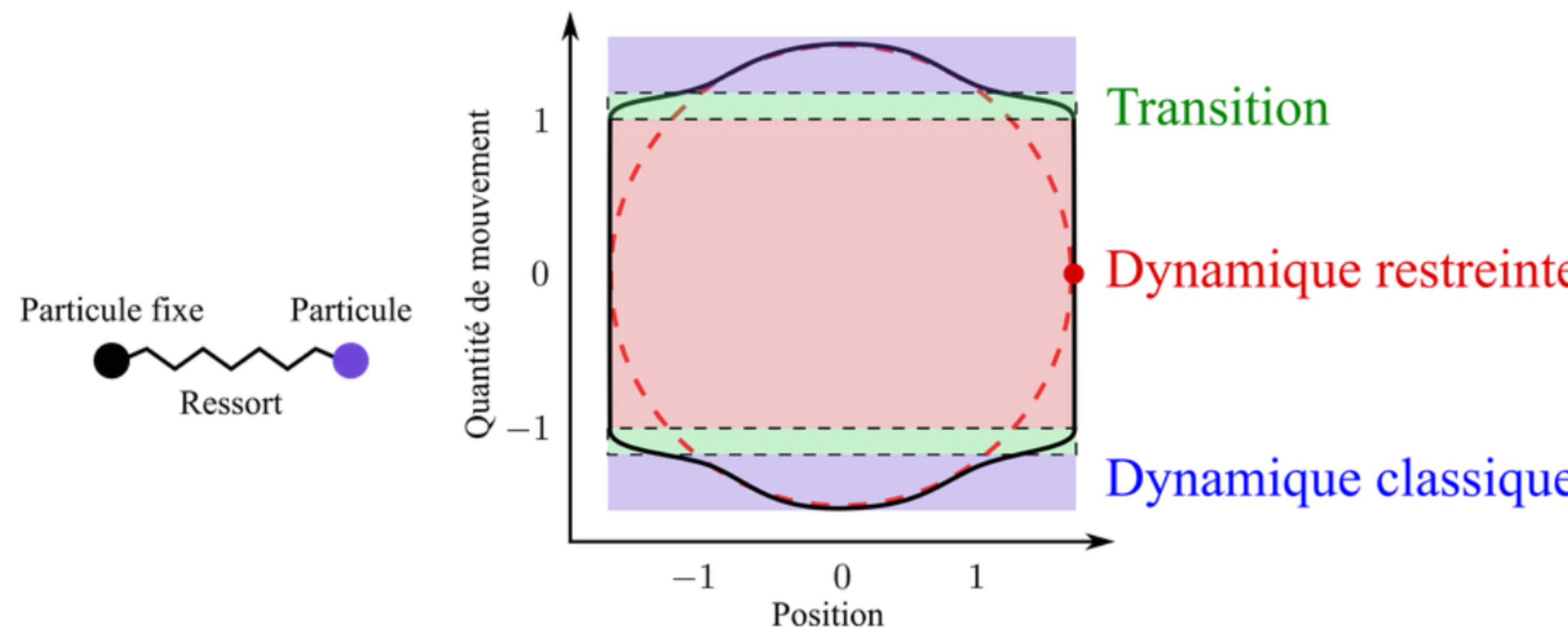
# Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

Issu de la Dynamique Moléculaire, [Artemova & Redon 2012]



# Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

Issu de la Dynamique Moléculaire, [Artemova & Redon 2012]

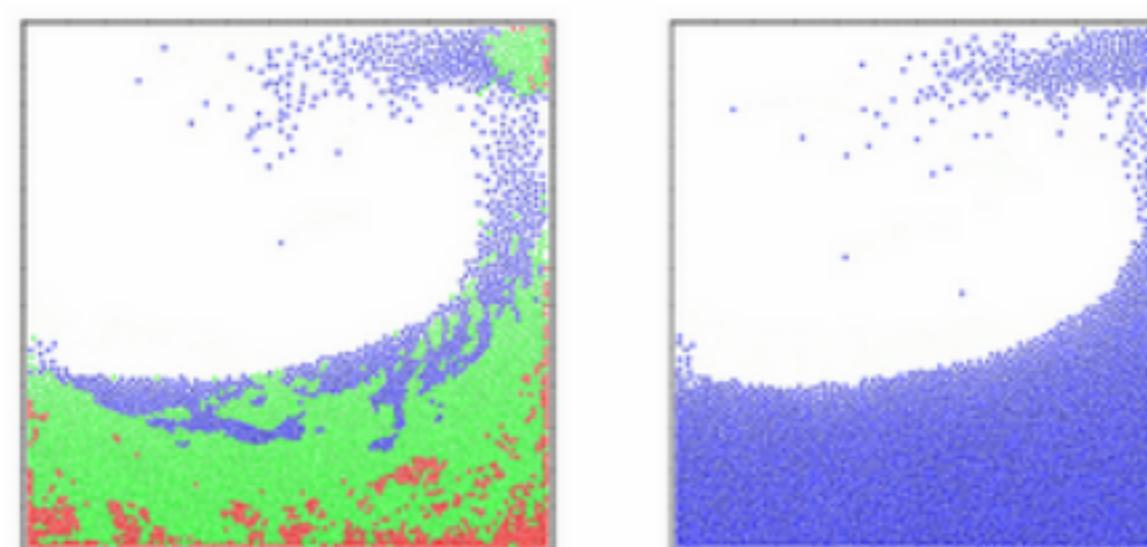


# Contributions

Extension de ARPS aux simulations graphiques

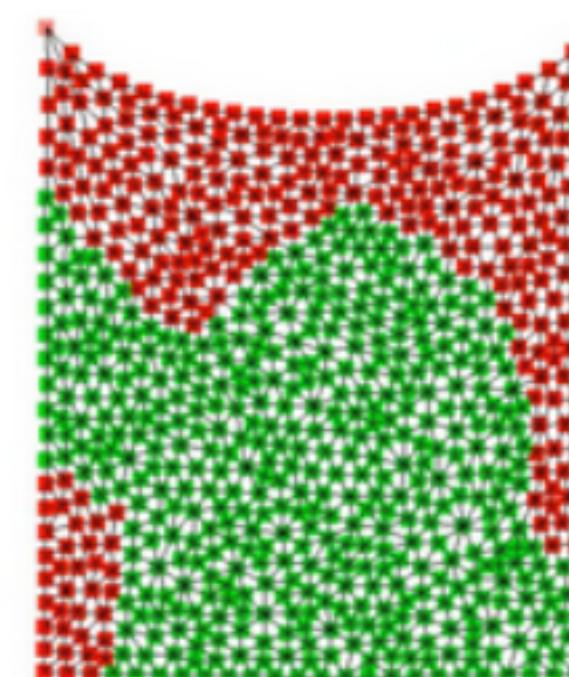
Simulation de liquide

ARPS + SPH



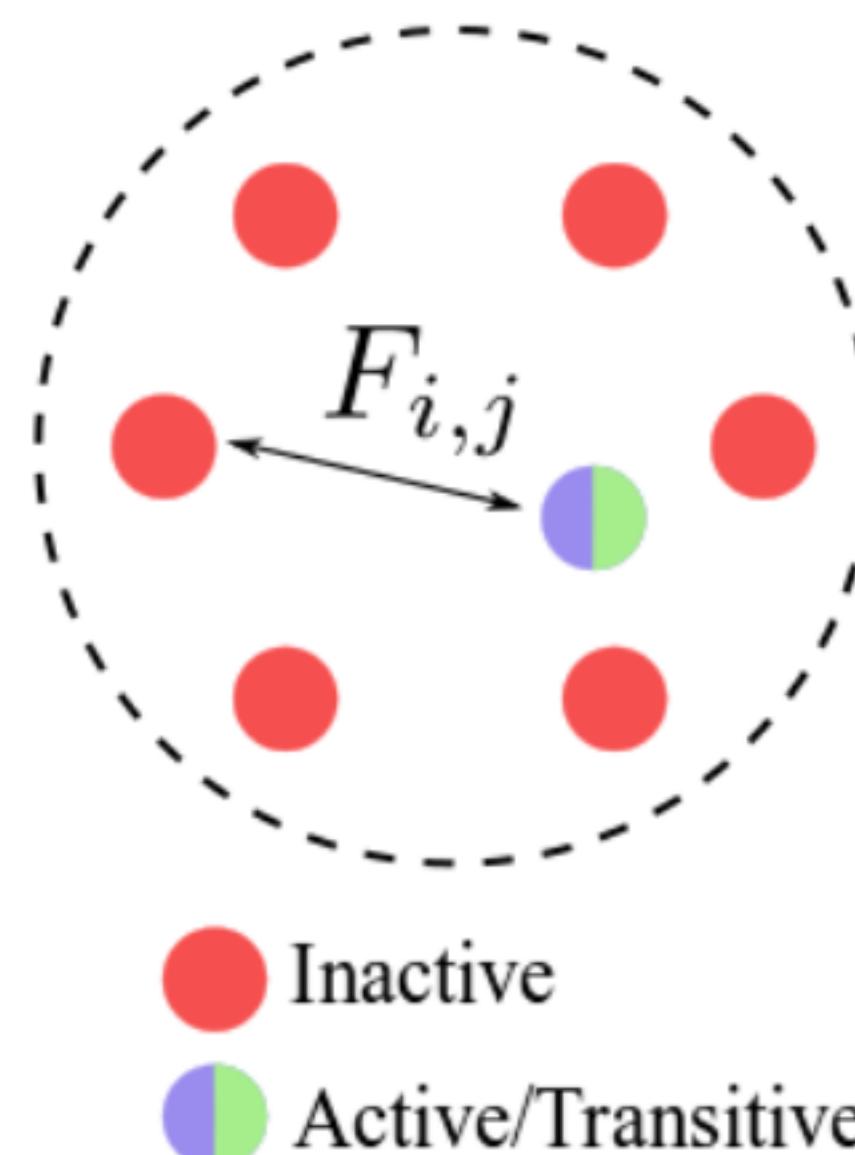
Simulation de vêtements

Intégrateur implicite



# Extension aux liquides particulaires

Combinaison simple avec l'ARPS



- Choix du modèle SPH [*Becker et al. 2007*]
- Algorithme incrémental SPH + ARPS

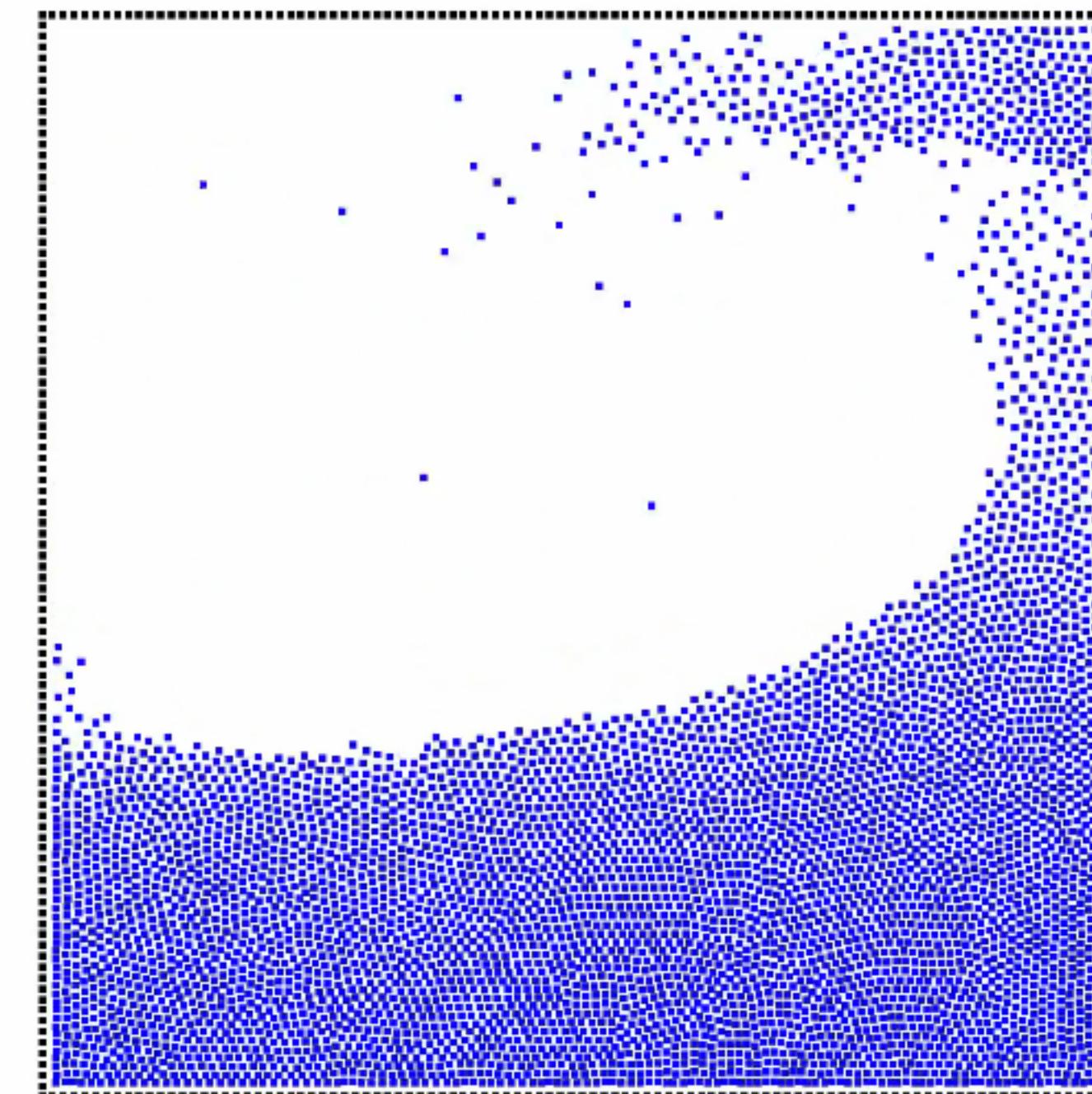
**Calcul restreint aux particules actives/transitives**

- Calcul des scalaires/forces
- **Recherche des voisins**

**Mise à jour des particules inactives par symétrie**

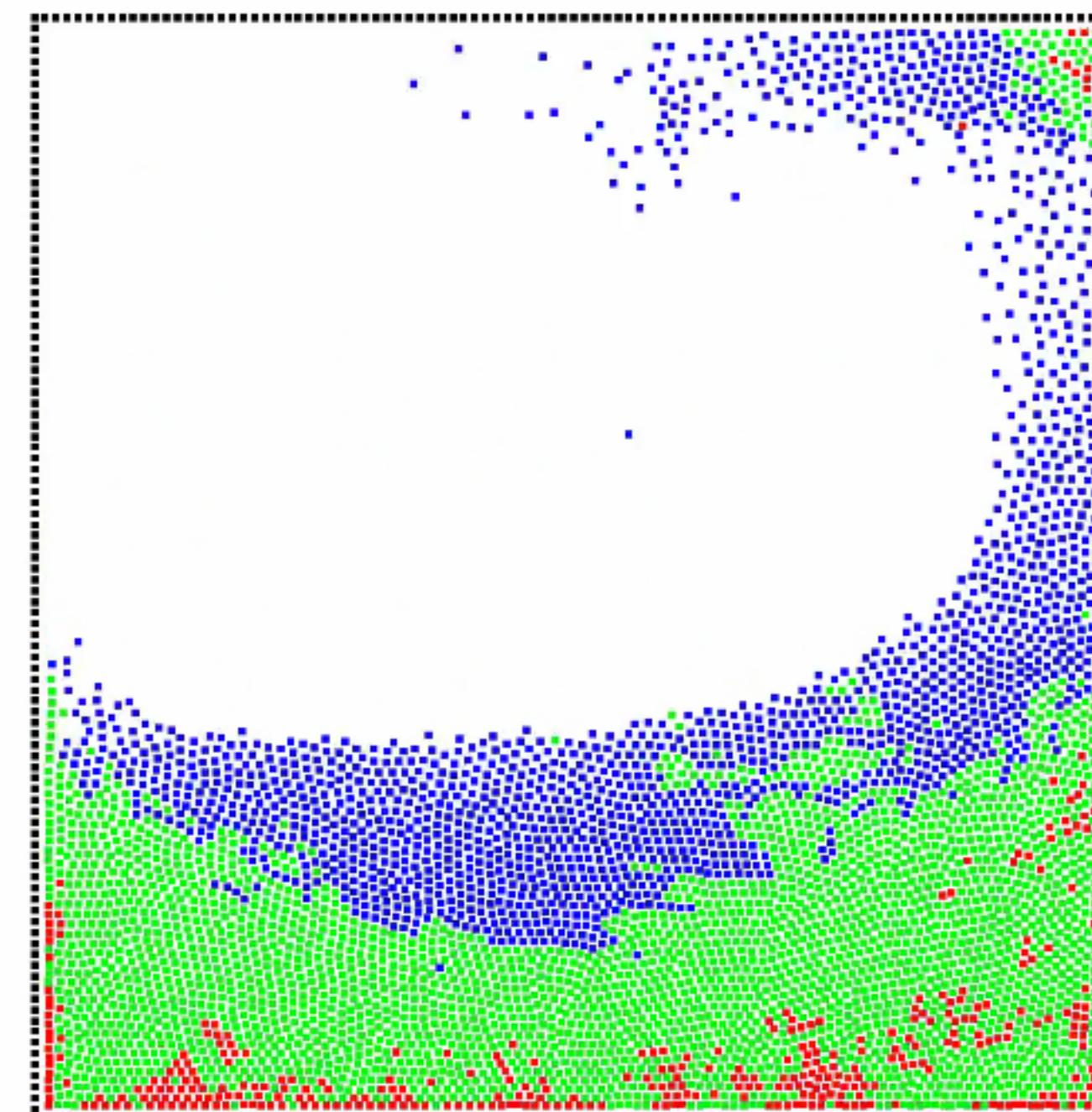
# Extension aux liquides particulaires

Dam Break - 5000 particules



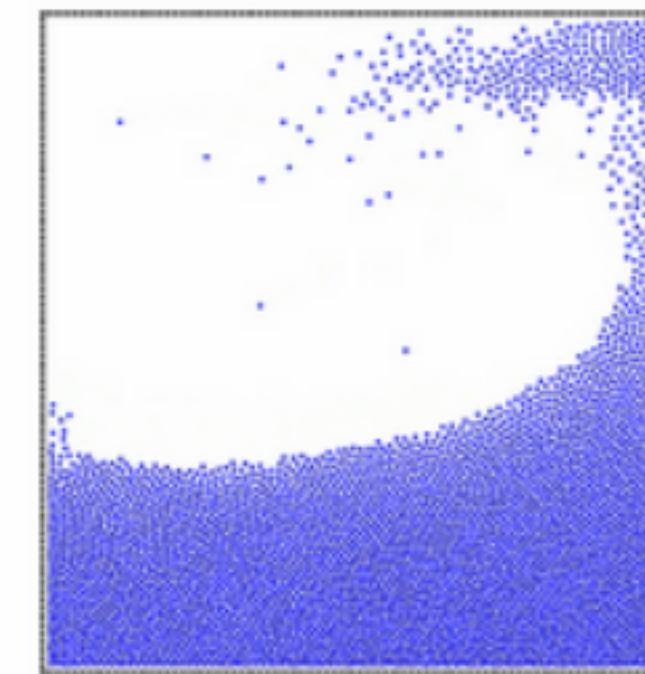
# Extension aux liquides particulaires

Dam Break - 5000 particules

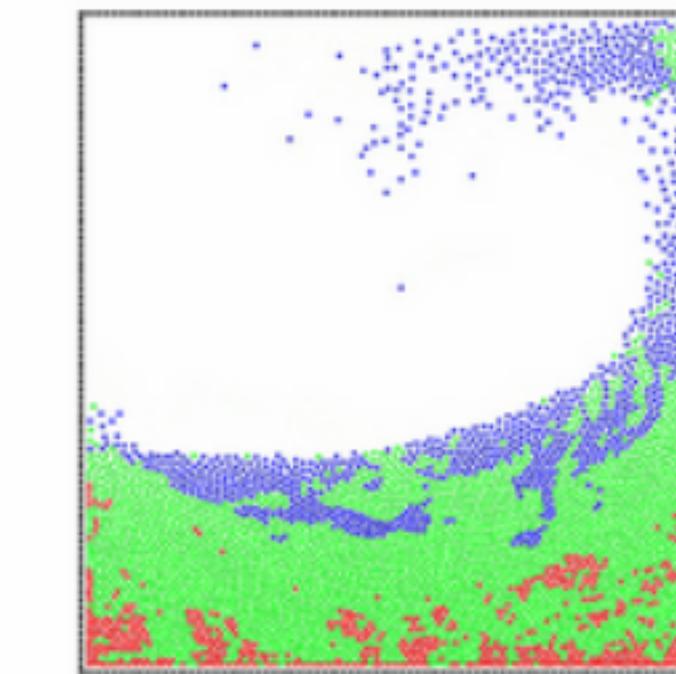


# Extension aux liquides particulaires

Dam Break - 5000 particules



SPH



SPH + ARPS

- Accélération : 3.85x
- Caractéristiques préservées

# Extension à la simulation de vêtement



Explicite

- Stabilité
- Petit  $\Delta t$

Implicite

- + Stabilité
- + Grand  $\Delta t$
- Coût

[Baraff&Witkin 1998]

$m$  masse

$\mathbf{p}$  quantité de mouvement

$\mathbf{f}$  force

$M$  Matrice de masse

$K$  Matrice de raideur

Résolution d'un système linéaire

$$(I - \Delta t^2 K M^{-1}) \Delta \mathbf{p} = \Delta t (\mathbf{f} + \Delta t K M^{-1} \mathbf{p})$$

# Extension à la simulation de vêtement

Intégration implicite de l'ARPS

$$(I - \Delta t^2 K \mathbf{R} M^{-1}) \Delta \mathbf{p} = \Delta t (\mathbf{f} + \Delta t K M^{-1} \mathbf{s})$$

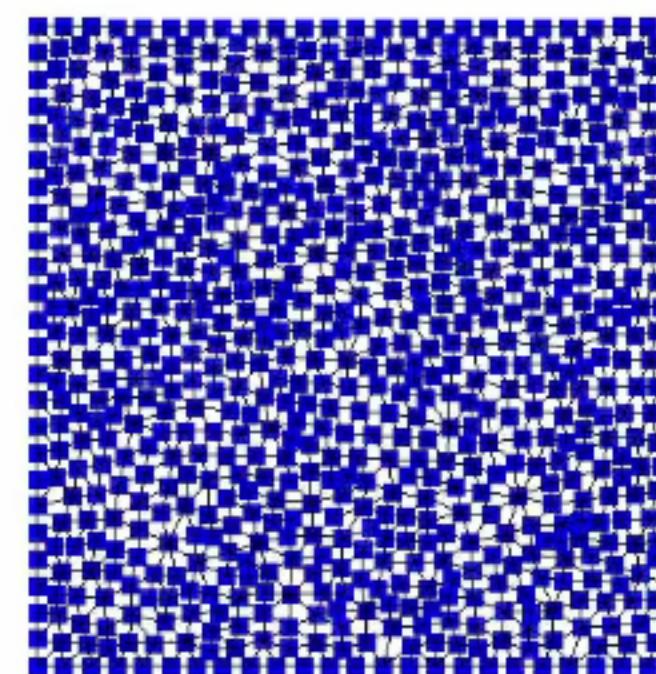
**R** matrice diagonale par bloc  
**s** vecteur      }      Encapsule la transition et l'état des particules

Inactif	$\begin{cases} R = \mathbf{0} \\ s = \mathbf{0} \end{cases}$	$I \Delta p = \Delta t \mathbf{f}$	Explicite
Actif	$\begin{cases} R = I \\ s = \mathbf{p} \end{cases}$	$(I - \Delta t^2 K M^{-1}) \Delta p = \Delta t (\mathbf{f} + \Delta t K M^{-1} \mathbf{p})$	Implicite

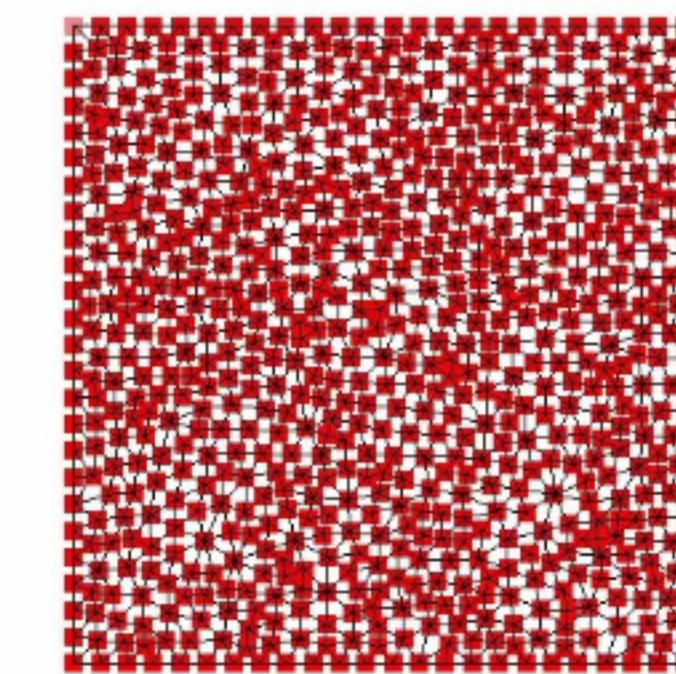
**Réduire la taille du système linéaire aux particules actives/transitives**

# Extension à la simulation de vêtement

Implicit Solver



ARPS Hybrid Solver

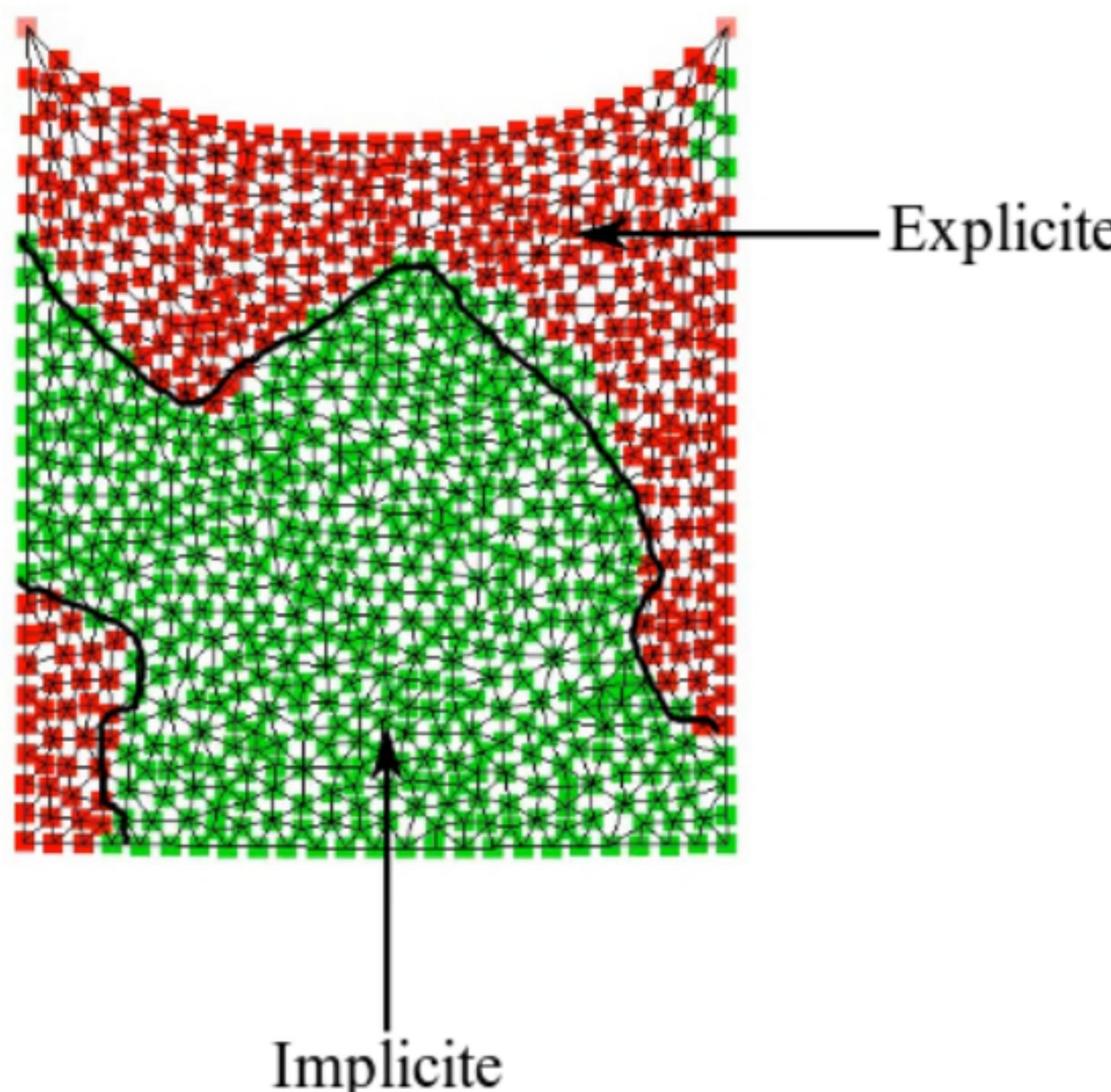


Full  
Transition  
Restrained

Speedup  
min 0.76 max 15.16 mean 2.7

Inactive particles are explicitly updated  
Therefore we reduce the implicit linear system

# Extension à la simulation de vêtement



- Accélération: 2.7x
- Taille système linéaire réduite

# Synthèse

Extension de l'ARPS à l'informatique graphique  
Approximation cohérente de simulation de particules

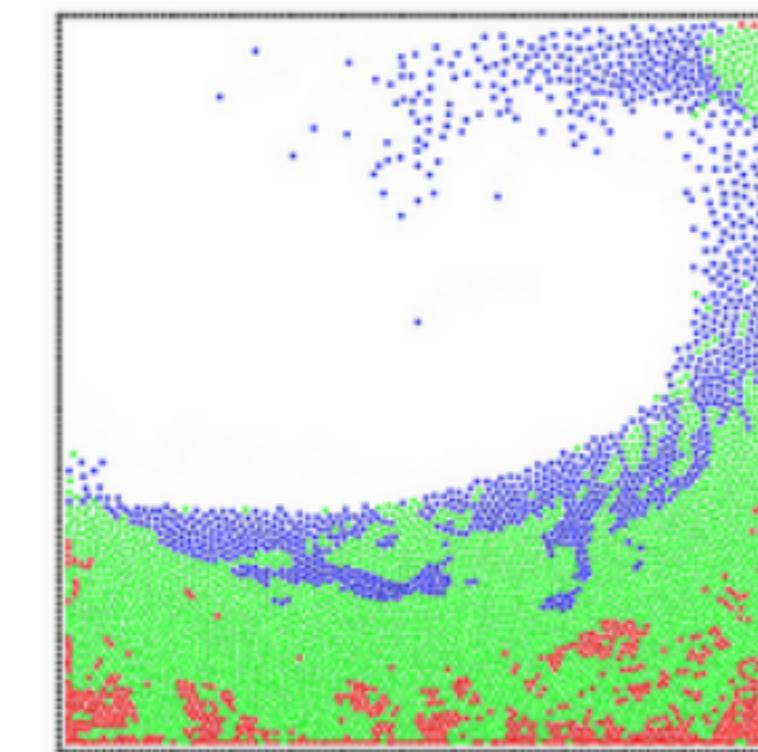
## Contributions

**Liquide** : Algorithme SPH+ARPS

**Vêtements** : Intégrateur implicite

+ Accélération importante

+ Coût mémoire constant



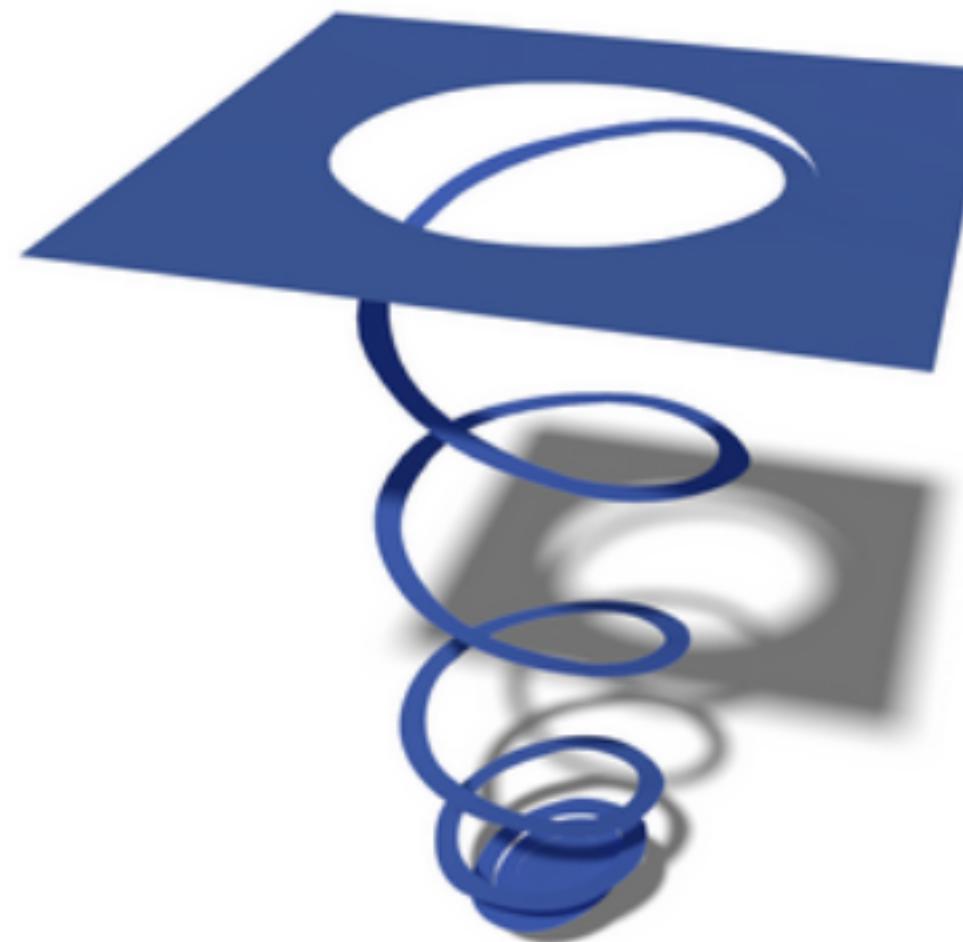
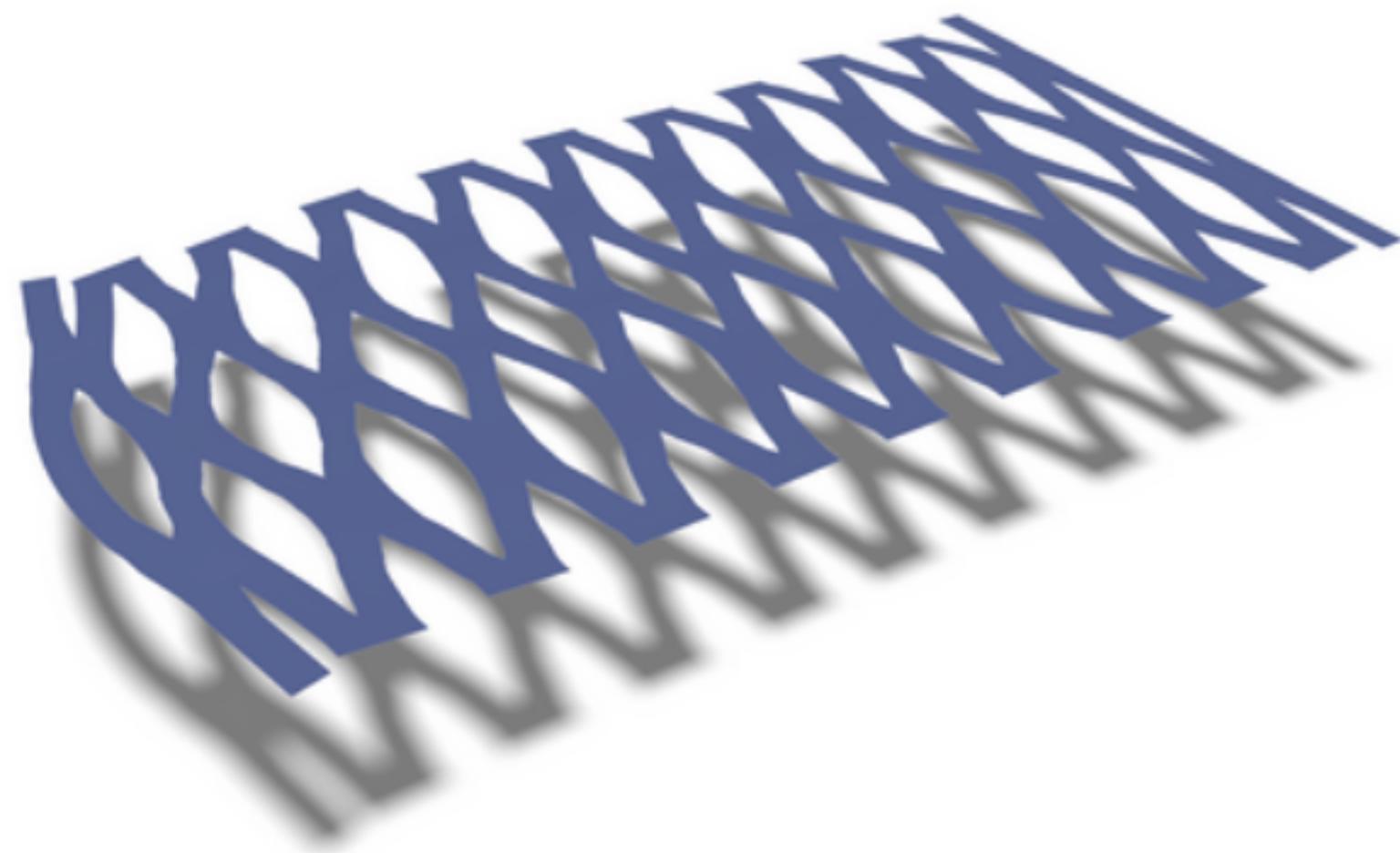
## Limitations & perspectives

- Instabilités intégrateur implicite
- Utilisation de critères visuels (distance caméra)

[Manteaux, Faure, Redon, Cani, VRIPHYS'13]

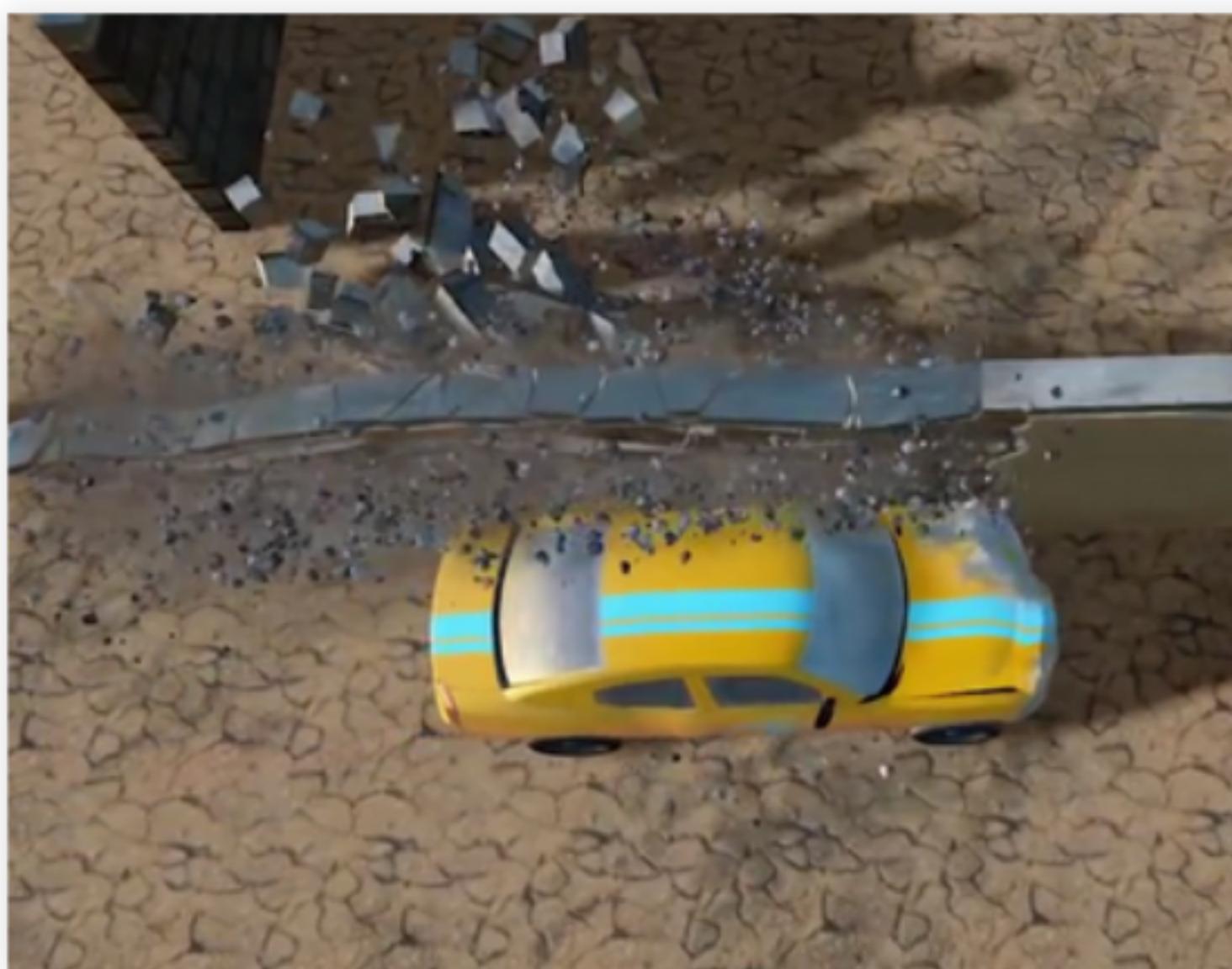
[Manteaux, Wojtan, Narain, Redon, Faure, Cani, CGF'16]

# Découpe détaillée et interactive d'objets fins



# Motivations

Changements topologiques = Immersion



*Havok*



*Unreal Engine 4*

Détails =  $f$  (degrés de liberté)

# Notre approche

Détails =  ~~$f$  (degrés de liberté)~~

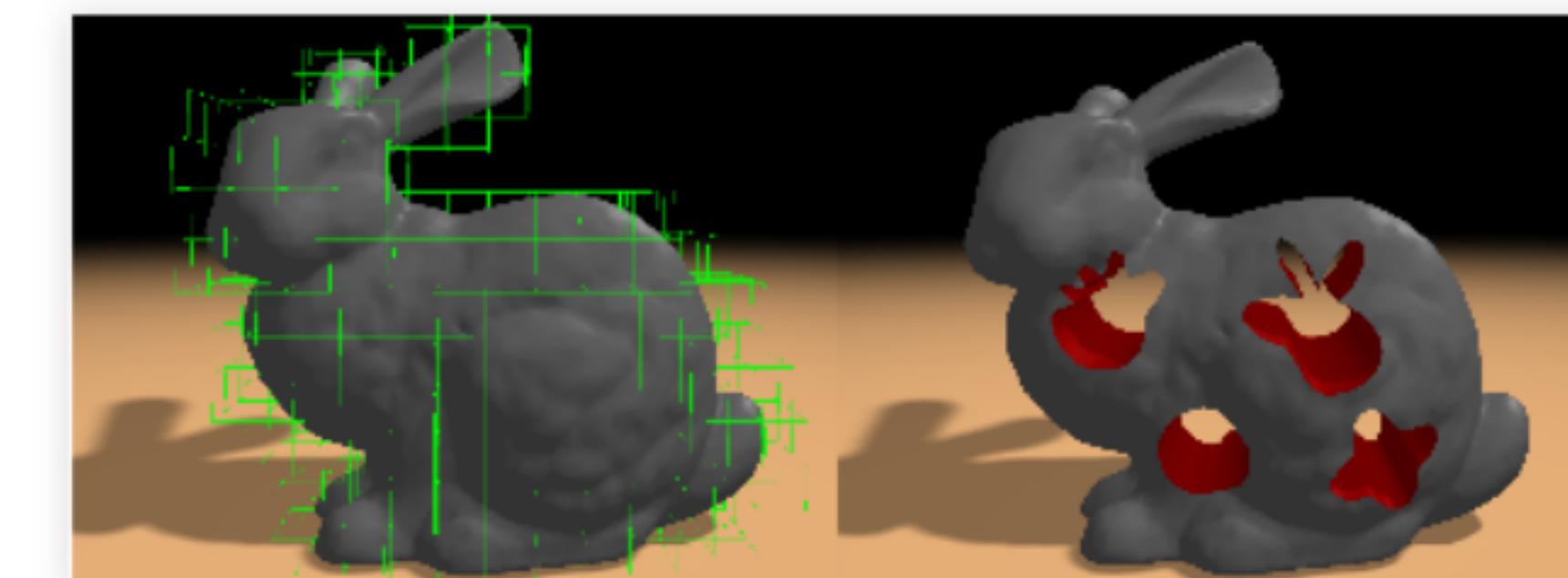


# État de l'art

## Changements topologiques



[Pfaff et al. 2014], 3010 DDL

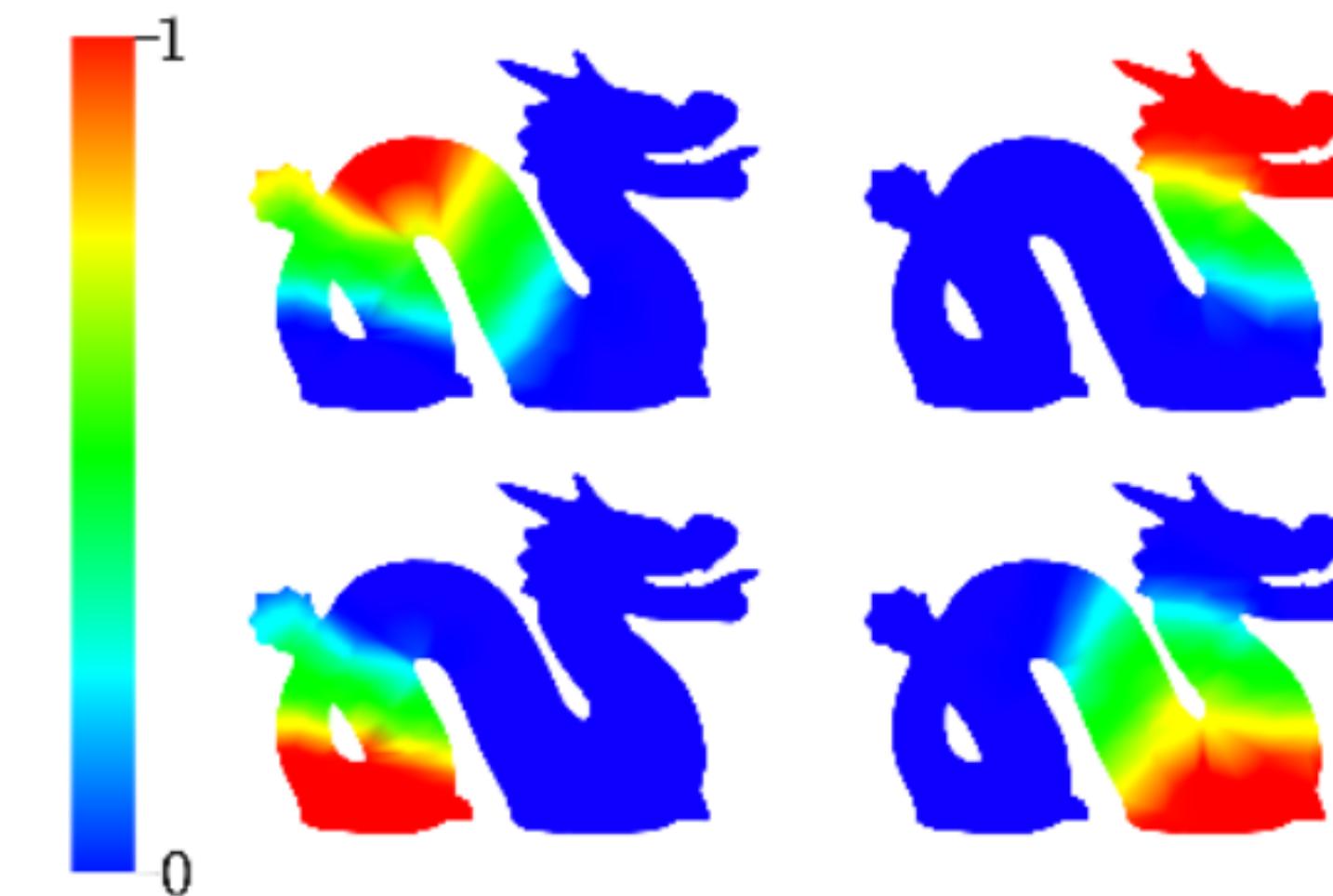
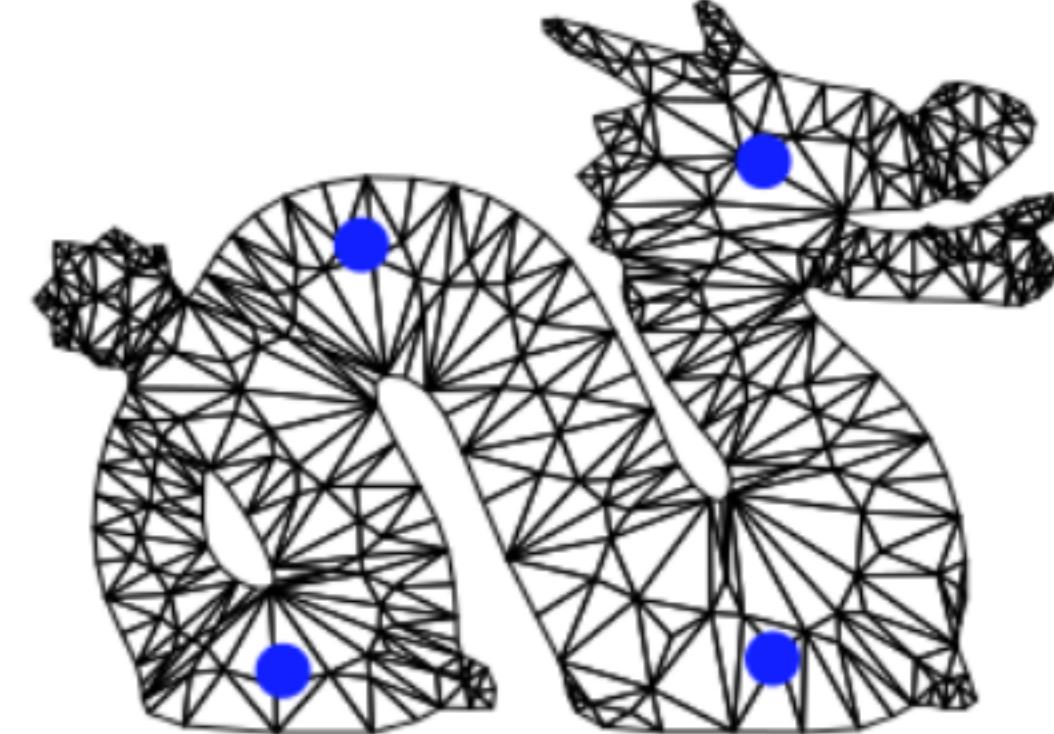


[Wu et al. 2011], 4485 DDL

**Variation importante du nombre de DDL**

# Modèle déformable à base de repères

[Gilles et al. 2011, Faure et al. 2012]

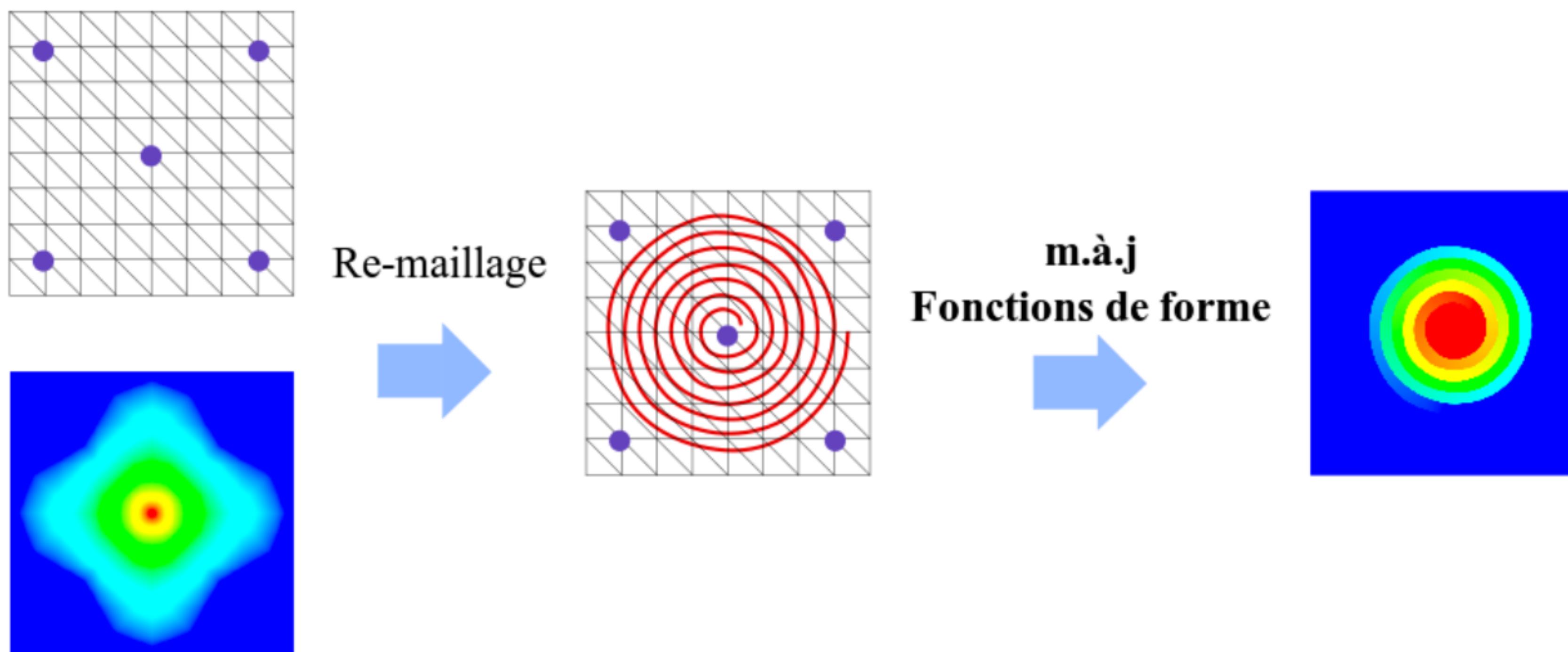


Fonctions de forme globales

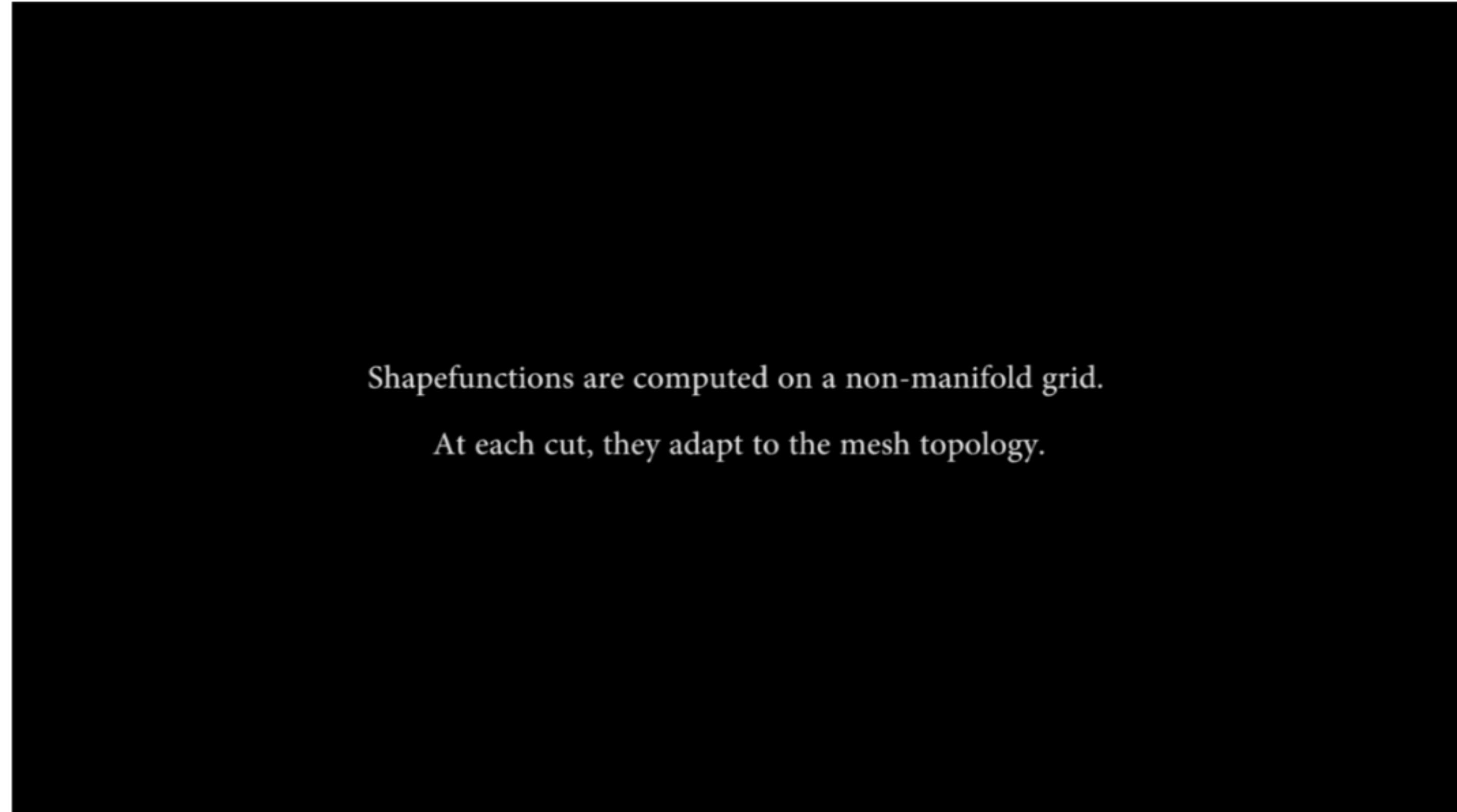


Très peu de DDL

# Processus de découpe



# Processus de découpe



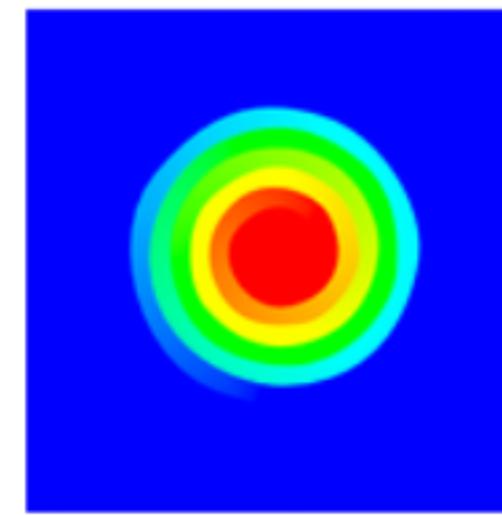
Shapefunctions are computed on a non-manifold grid.

At each cut, they adapt to the mesh topology.

# Contributions

Découpe détaillée, très peu de DDL

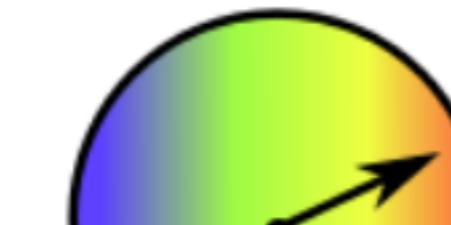
M.à.j fonctions de formes



Ré-échantillonnage des repères



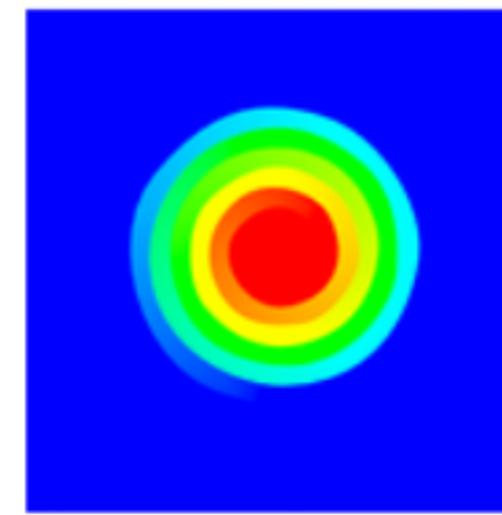
Mise à jour incrémentale



# Contributions

Découpe détaillée, très peu de DDL

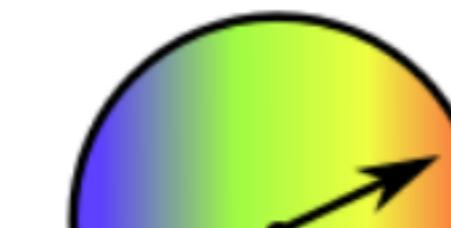
M.à.j fonctions de formes



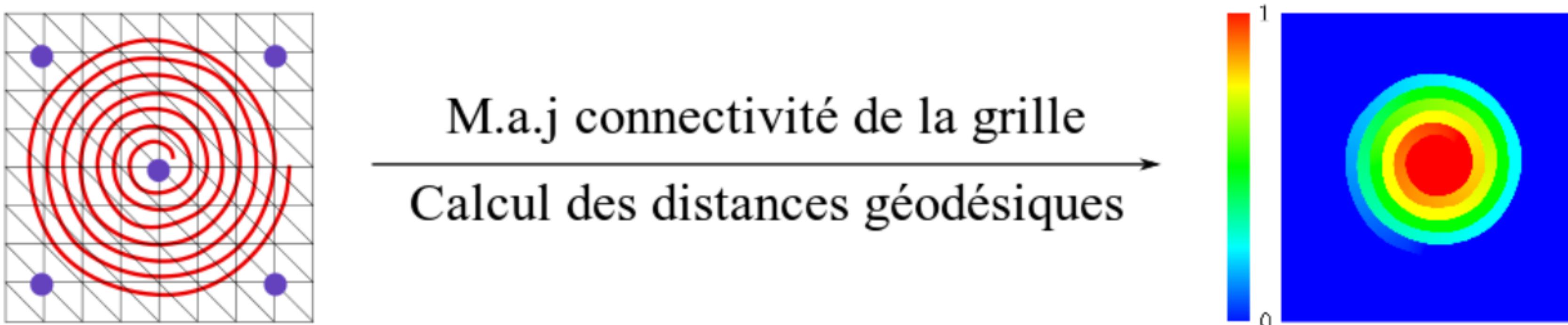
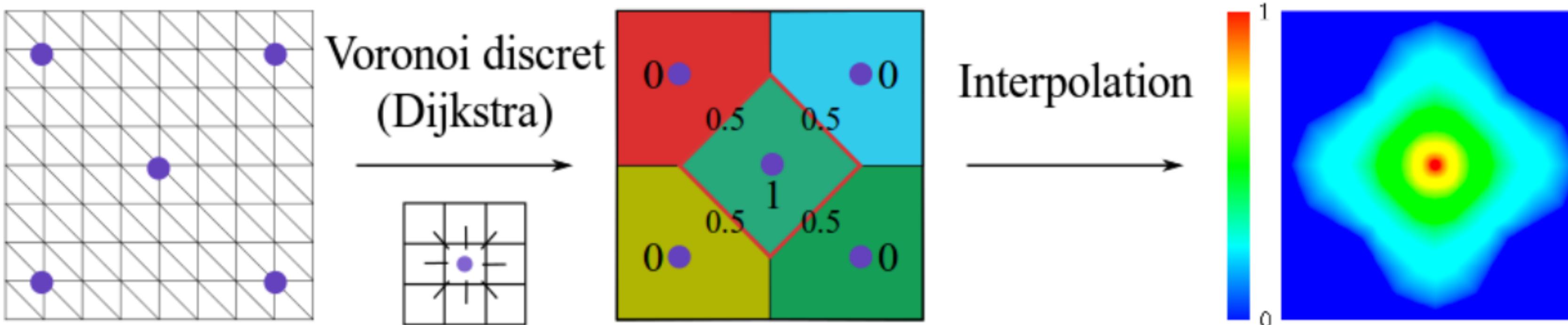
Ré-échantillonnage des repères



Mise à jour incrémentale



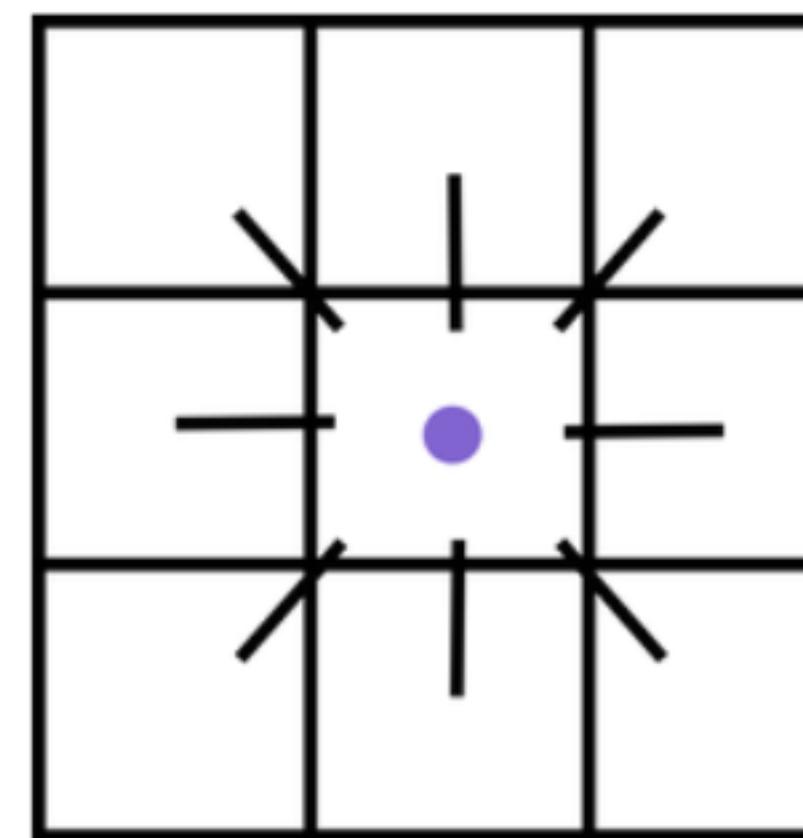
# M.à.j des fonctions de forme



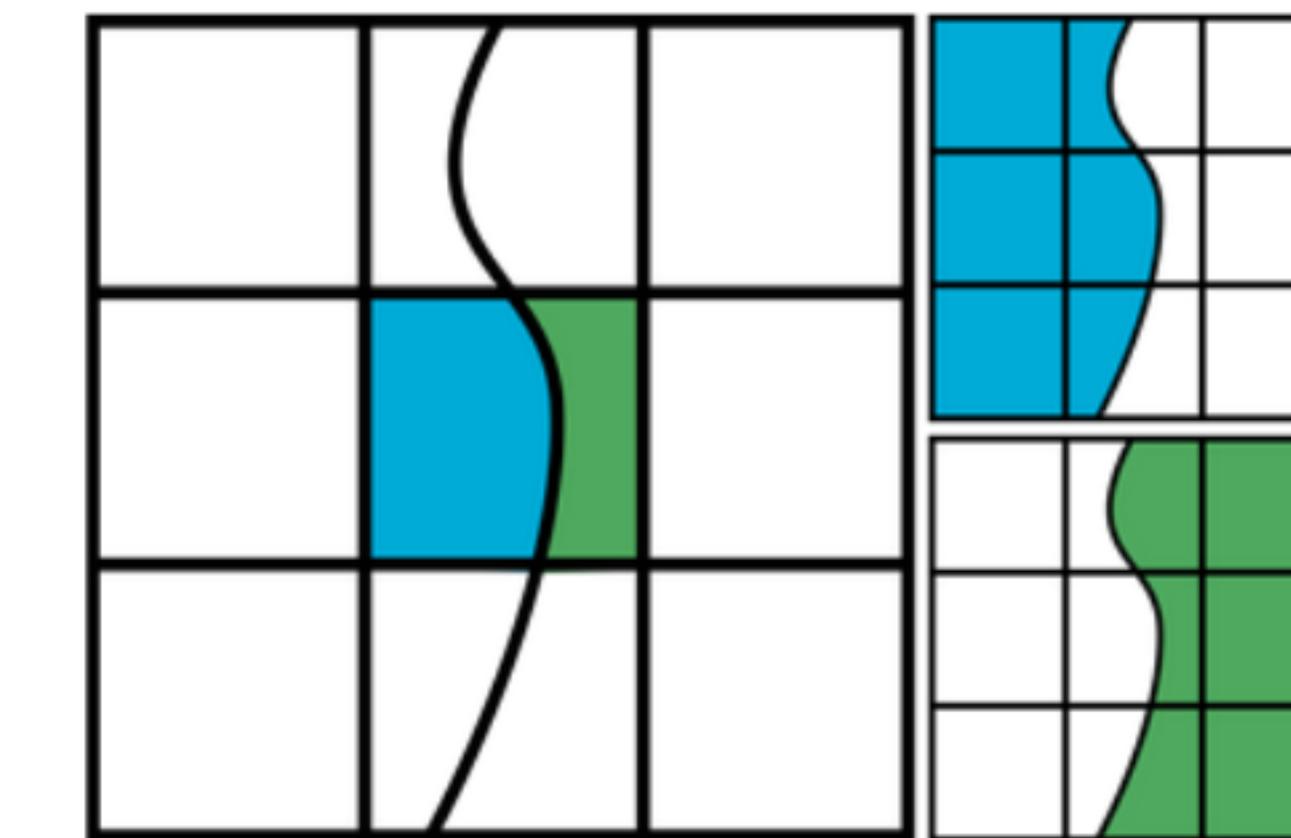
# M.à.j des fonctions de forme

## Grille non-variété

Plusieurs connectivités indépendantes dans une cellule



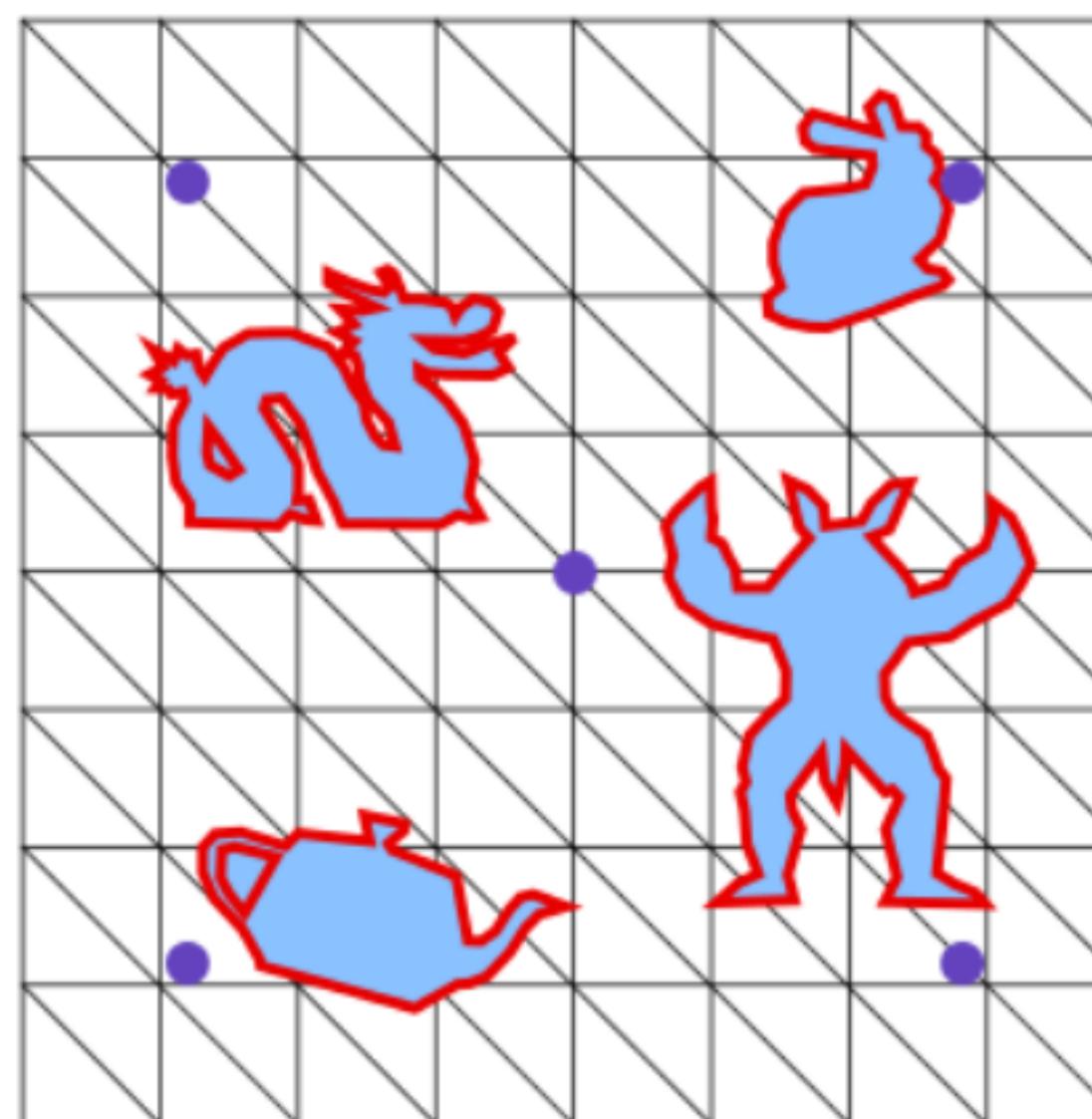
Connectivité classique  
8 voisins



Deux duplcats  
5 voisins chacun

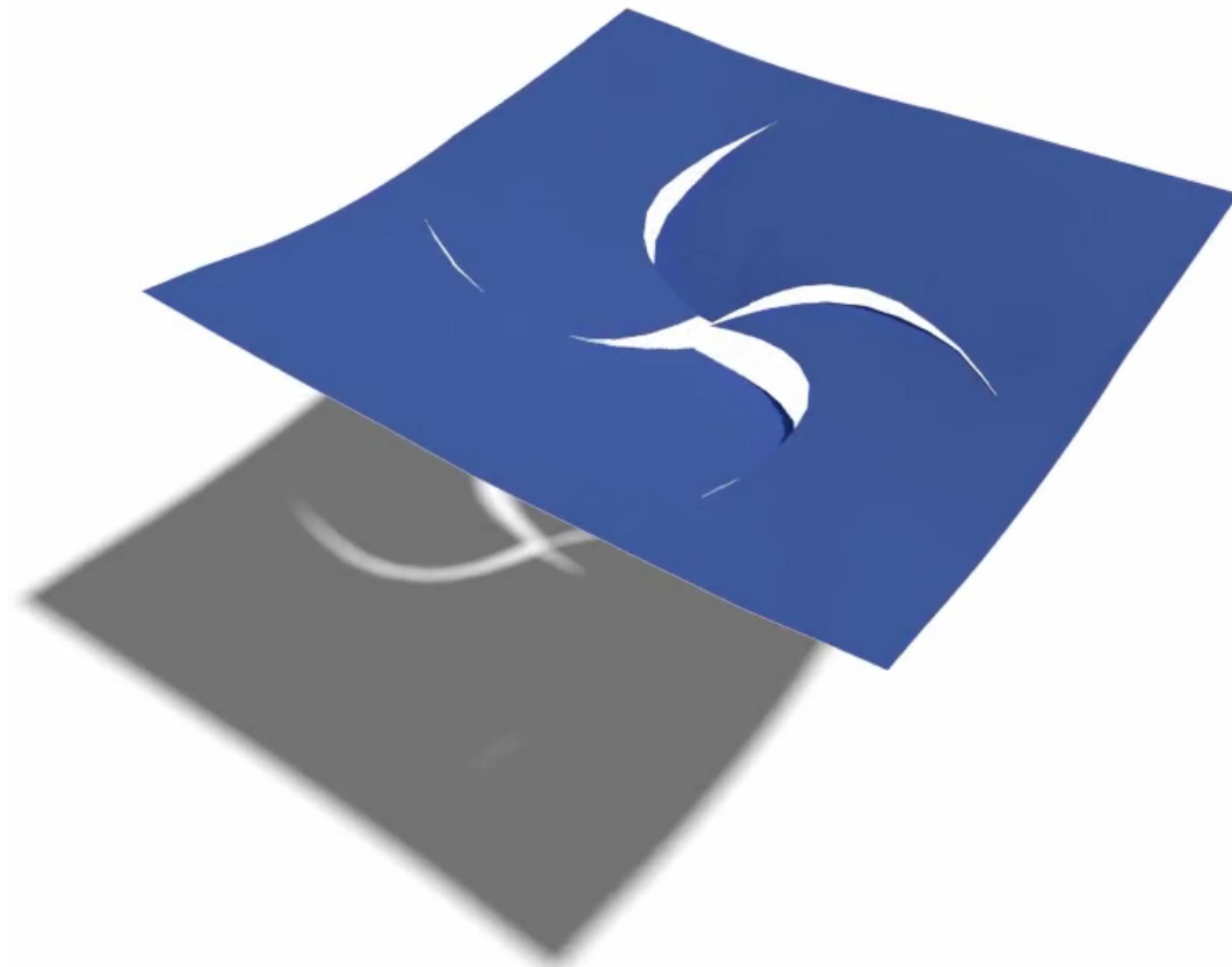
- Indépendance résolution / détails
- Gestion simple des composantes connexes

# Ré-échantillonnage des repères



- Détecer régions vides - Algorithme de remplissage
- Échantillonnage uniforme - Relaxation de Lloyd
- Réduction des discontinuités - Interpolation orientation/vitesse

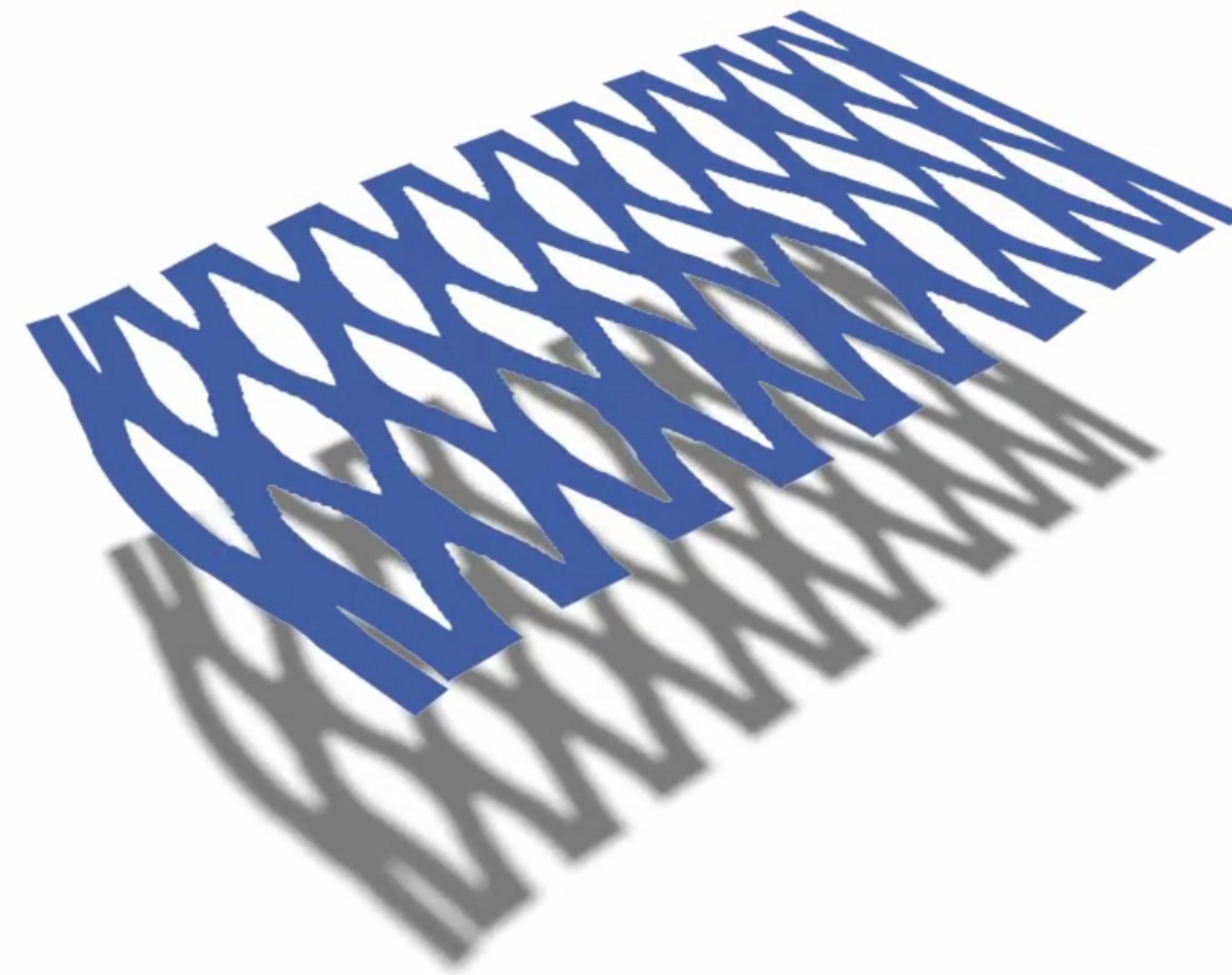
# Résultats



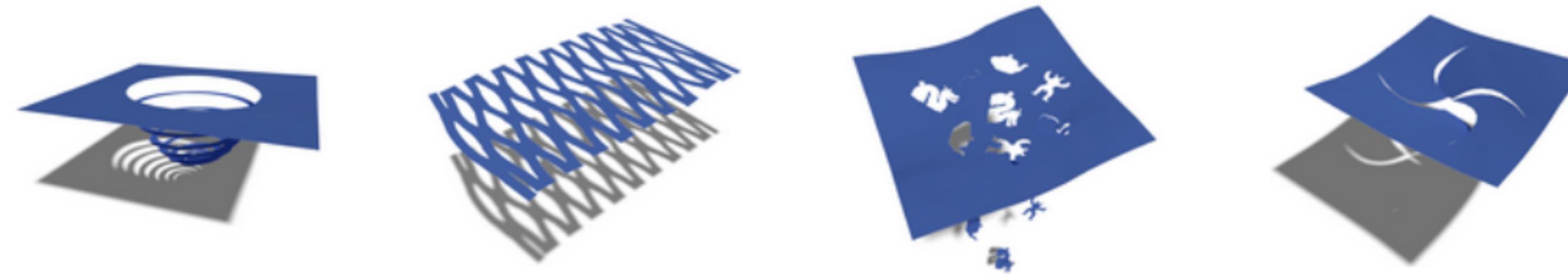
# Résultats



# Résultats



# Performances



#Repères	5	47	5 → 12	5
FPS Avant   Après	60   60	11   11	60   45	45   35
% m.à.j	43	17	5	15

# Synthèse

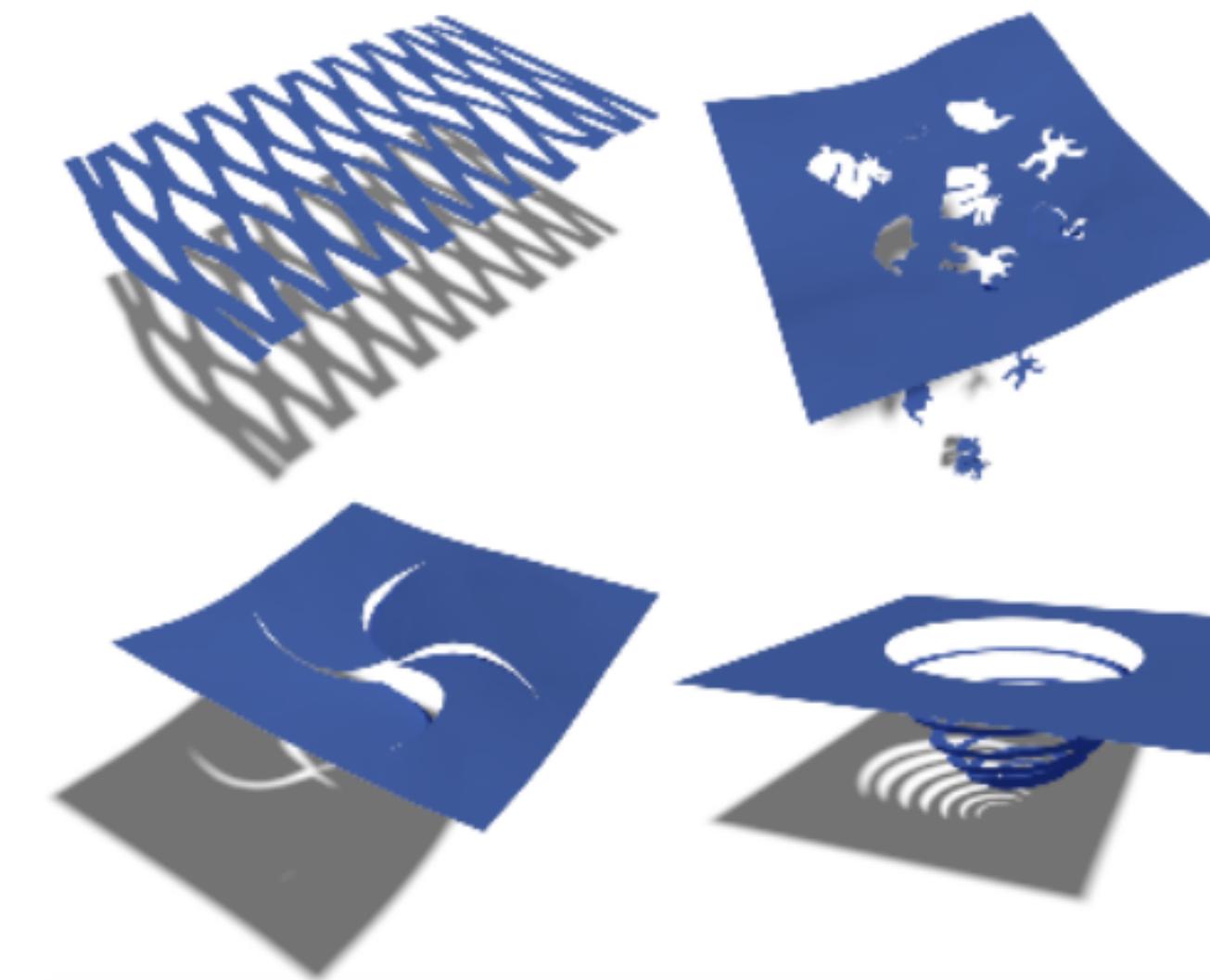
Découpe interactive/détaillée avec très peu de d.d.l

## Contributions

- M.à.j fonctions de forme
- Ré-échantillonnage des repères
- M.à.j incrémentale

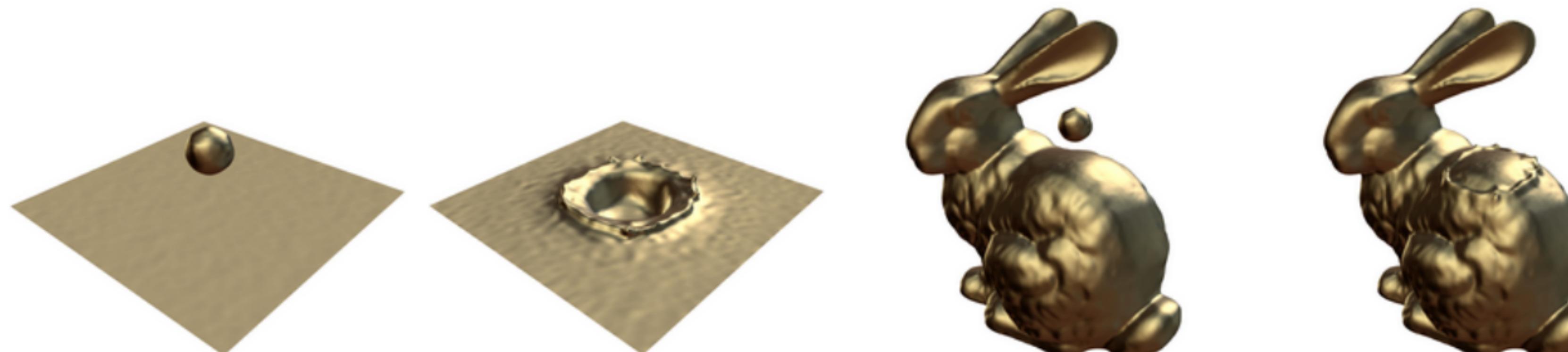
## Limitations & perspectives

- Comparaison avec un modèle F.E.M
- Objets volumiques : Grille non-variété ?
- Fracture + détails procéduraux  
*[Lejemble et al. 2015]*



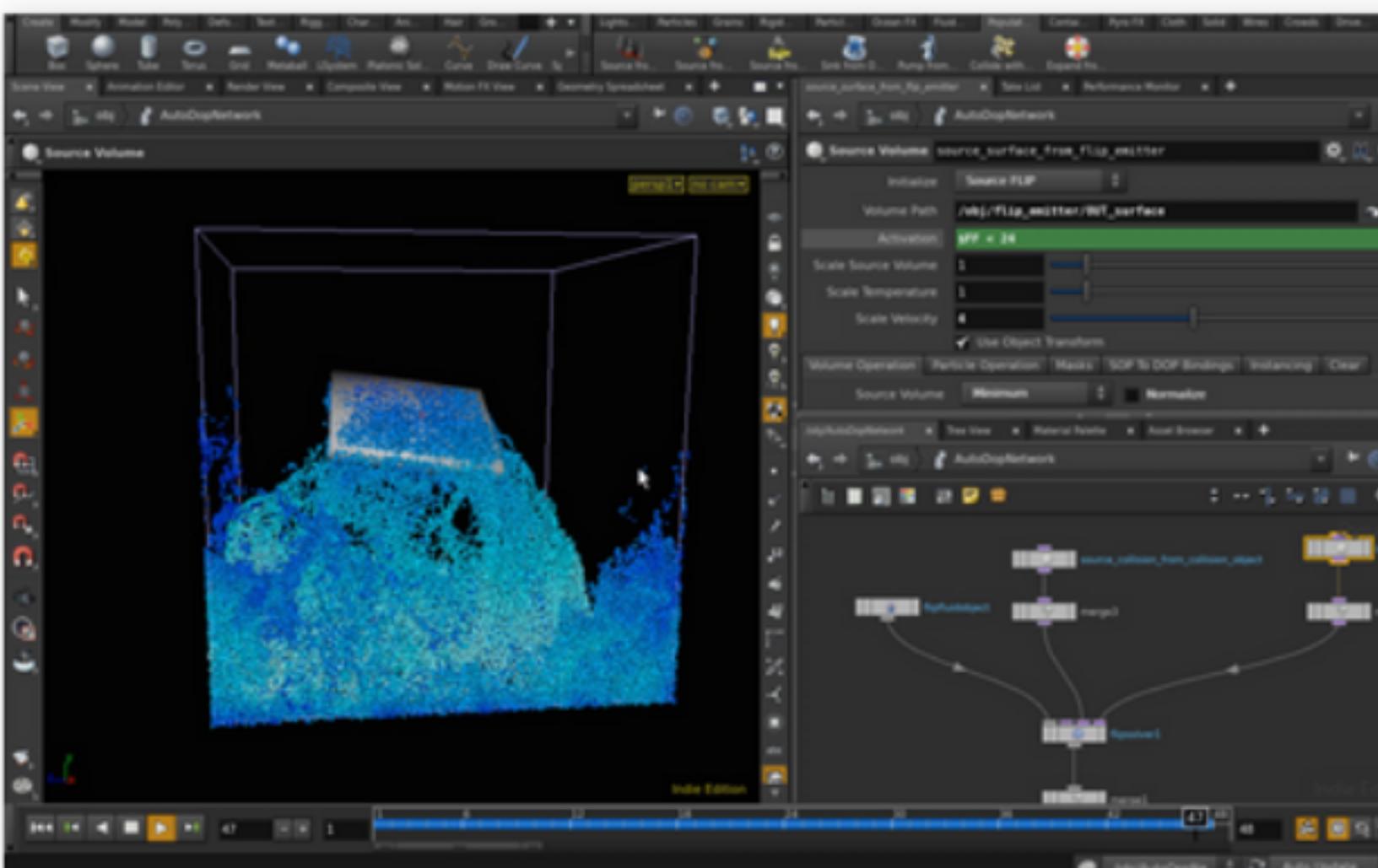
*[Manteaux, Sun, Faure, Cani, O'Brien, MIG'15]*

# Sculpture espace-temps d'animations de liquides



# Motivations

Des centaines de simulations avant "la bonne"



[Houdini, DreamWorks]



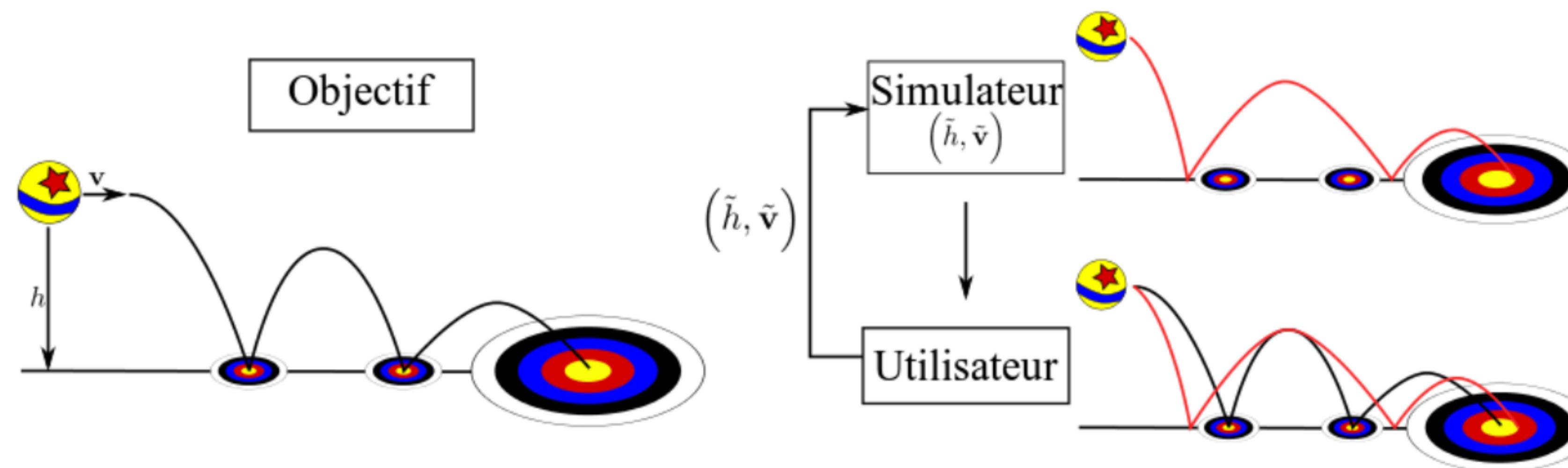
*Life of Pi*



*X-men : days of future past*

# Motivation

Approche classique : Processus essai-erreur

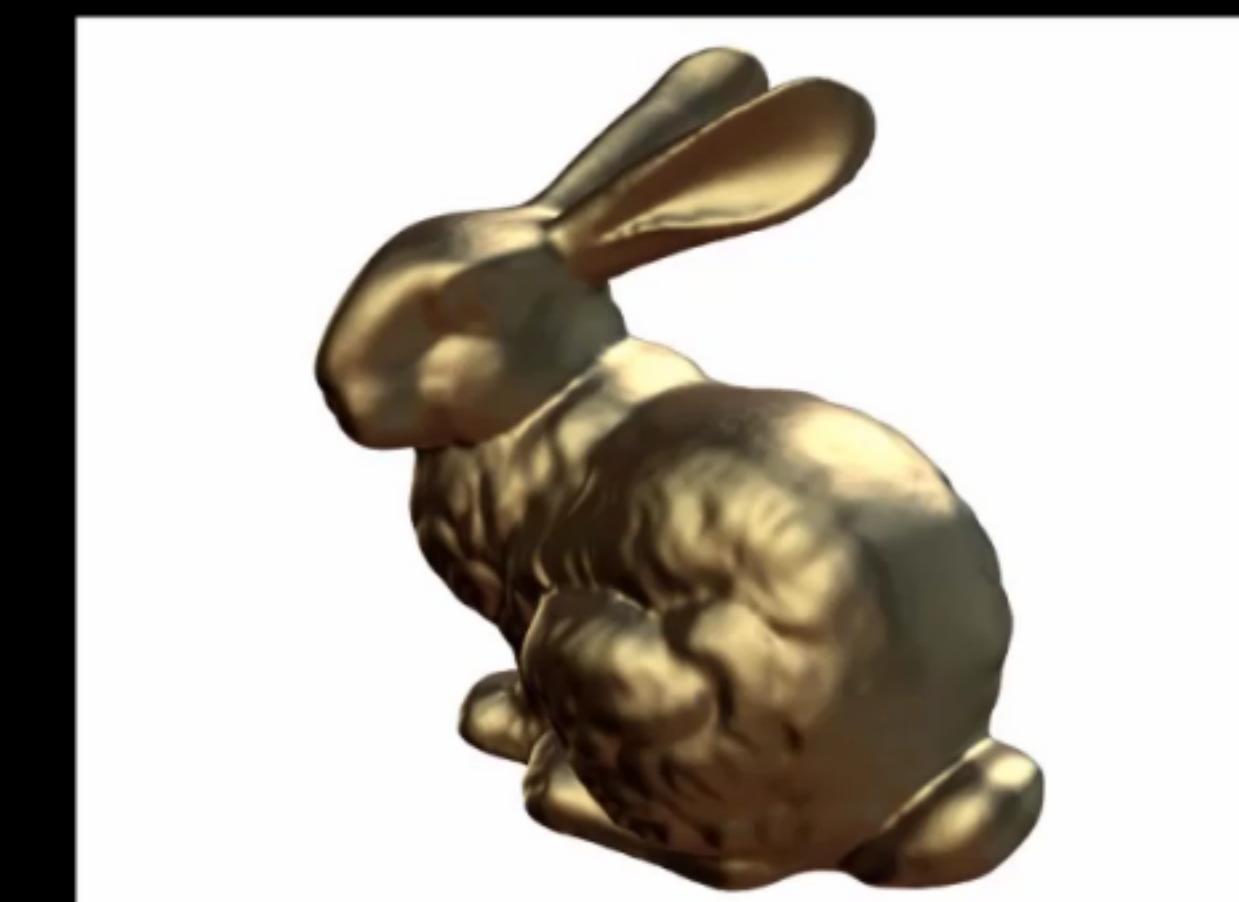
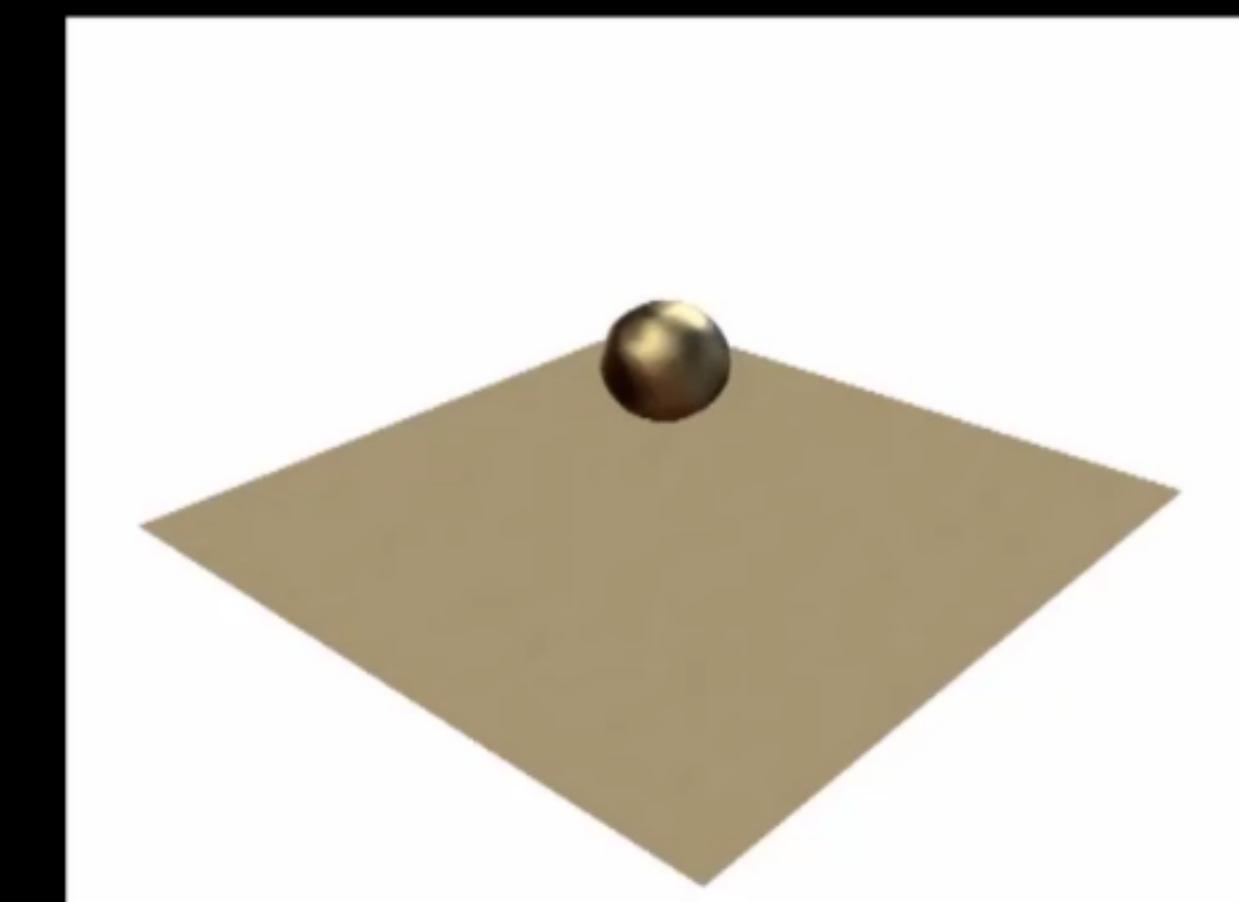


- Paramètres nombreux et indirects
- Coût calculatoire élevé
- Passage à l'échelle

# Notre approche

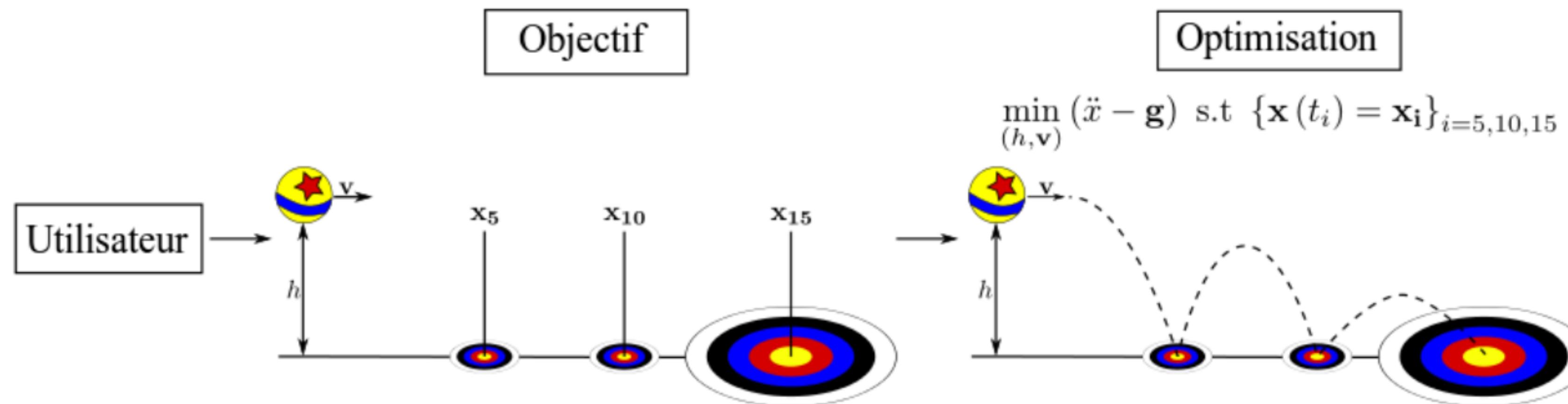
Édition Interactive - Intuitive - Réutilisable

Input animations



# État de l'art : Contrôle de simulation

Contraintes spatio-temporelles [*Witkin and Kass, 1988*]

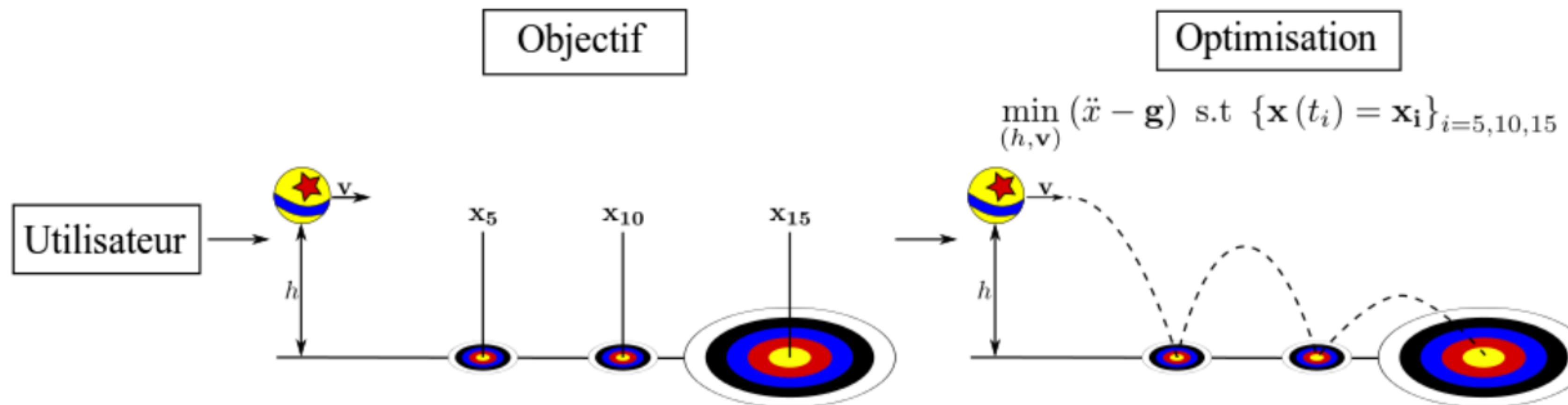


+ Contrôle direct

- Coût Élevé

# État de l'art : Contrôle de simulation

Contraintes spatio-temporelles [*Witkin and Kass, 1988*]



+ Contrôle direct

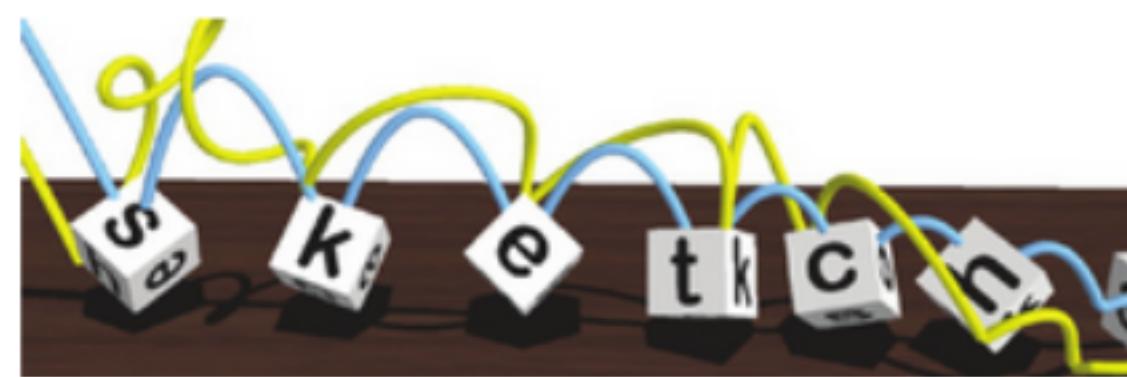
- Coût Élevé

Formulation intuitive des contraintes

Résolution numérique efficace

# État de l'art : Contrôle de simulation

## Rigides



[Popovic et al. 2003]

## Déformables



[Barbic et al. 2012]

- + Contrôle direct
- + Méthodes interactives
- Changements topologiques

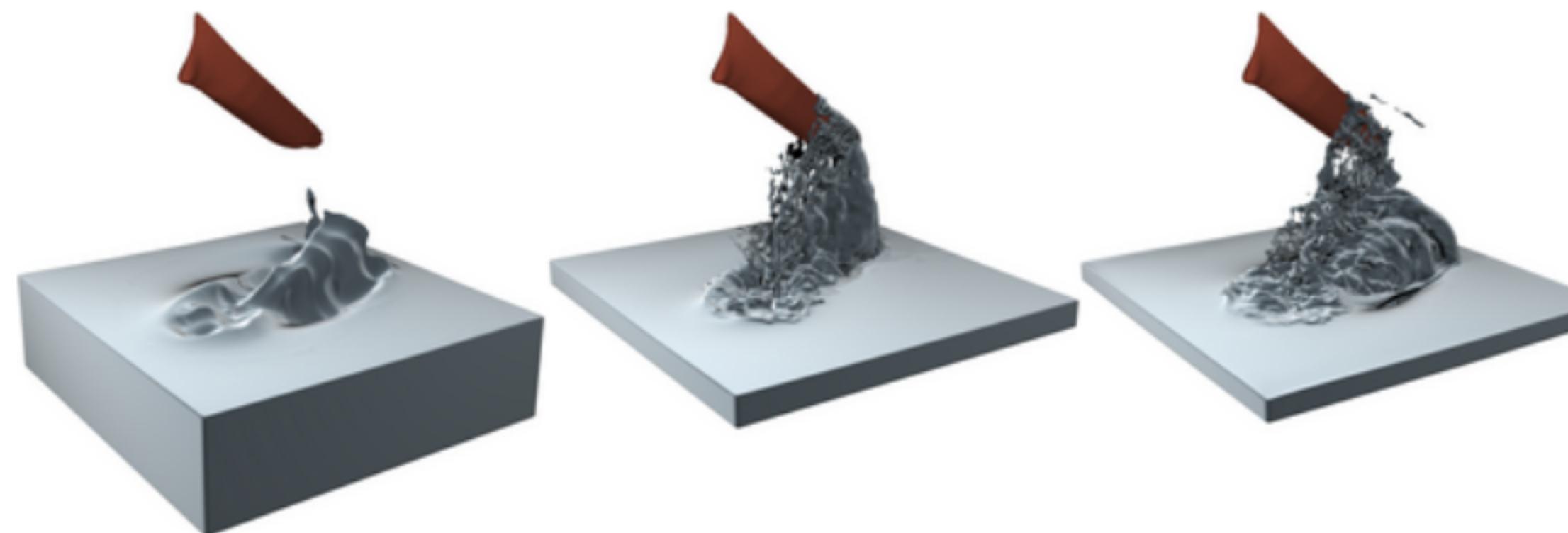
## Liquides



[McNamara et al. 2004]

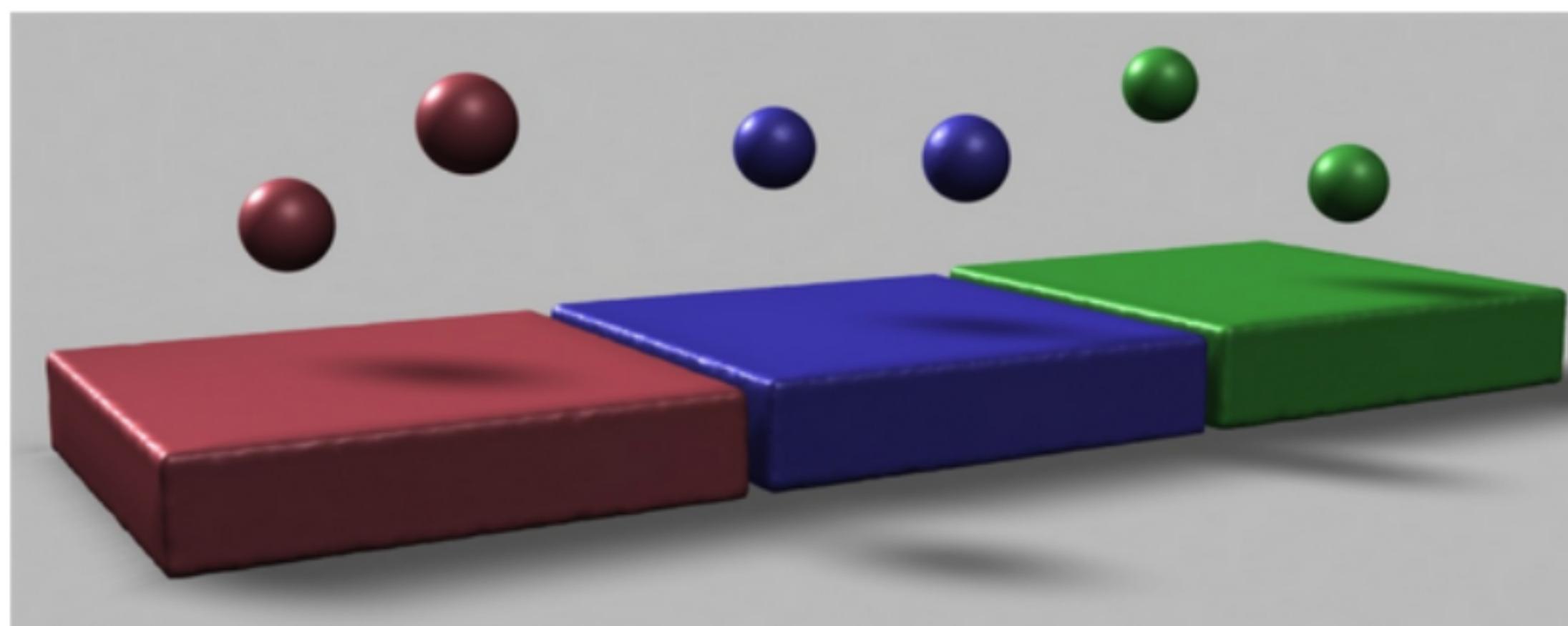
- Coût très élevé

# État de l'art : Contrôle de simulation



- + Passage à l'échelle
- + Coût réduit
- Contrôle indirect

**Simulation guide** [Nielsen et al. 2011]

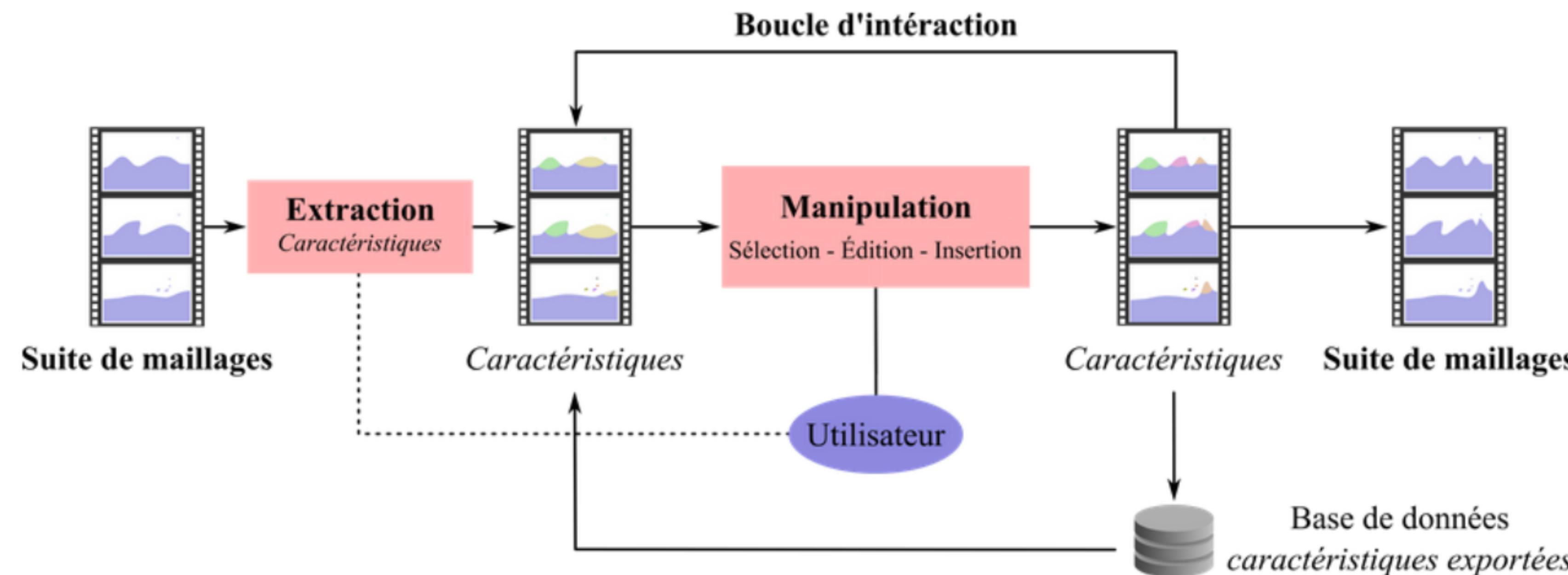


- + Exploration simple
- + Ré-utilisation simulation
- Contrôle indirect

**Interpolation d'animation** [Raveendran et al. 2014]

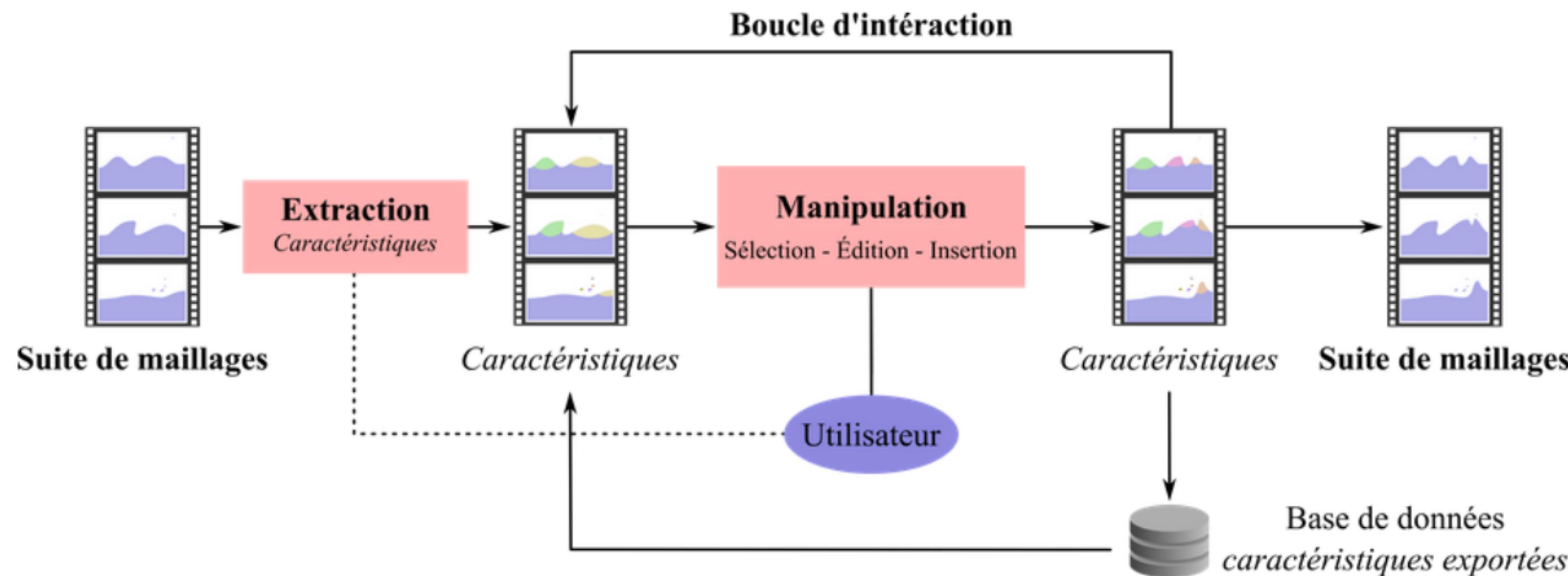
# Contributions

## Sculpture d'animations de liquide



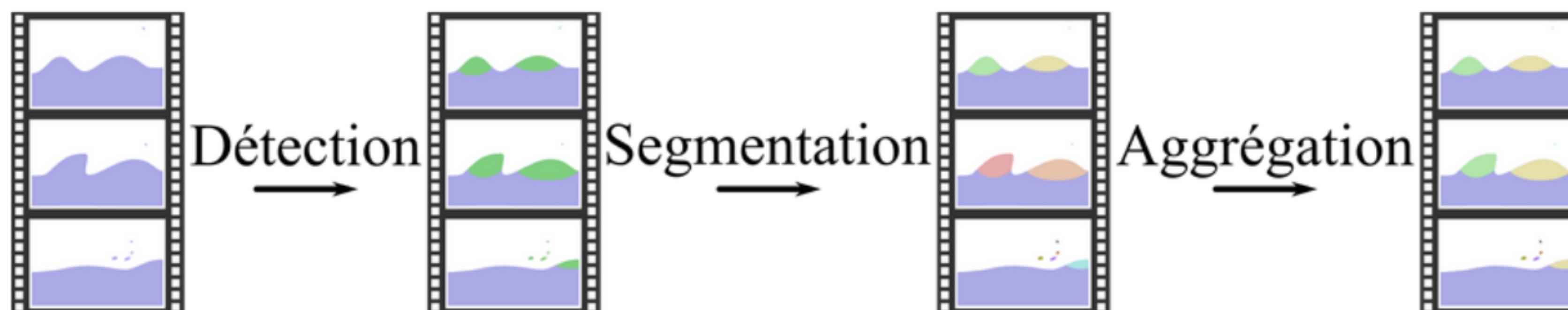
# Contributions

## Sculpture d'animations de liquide



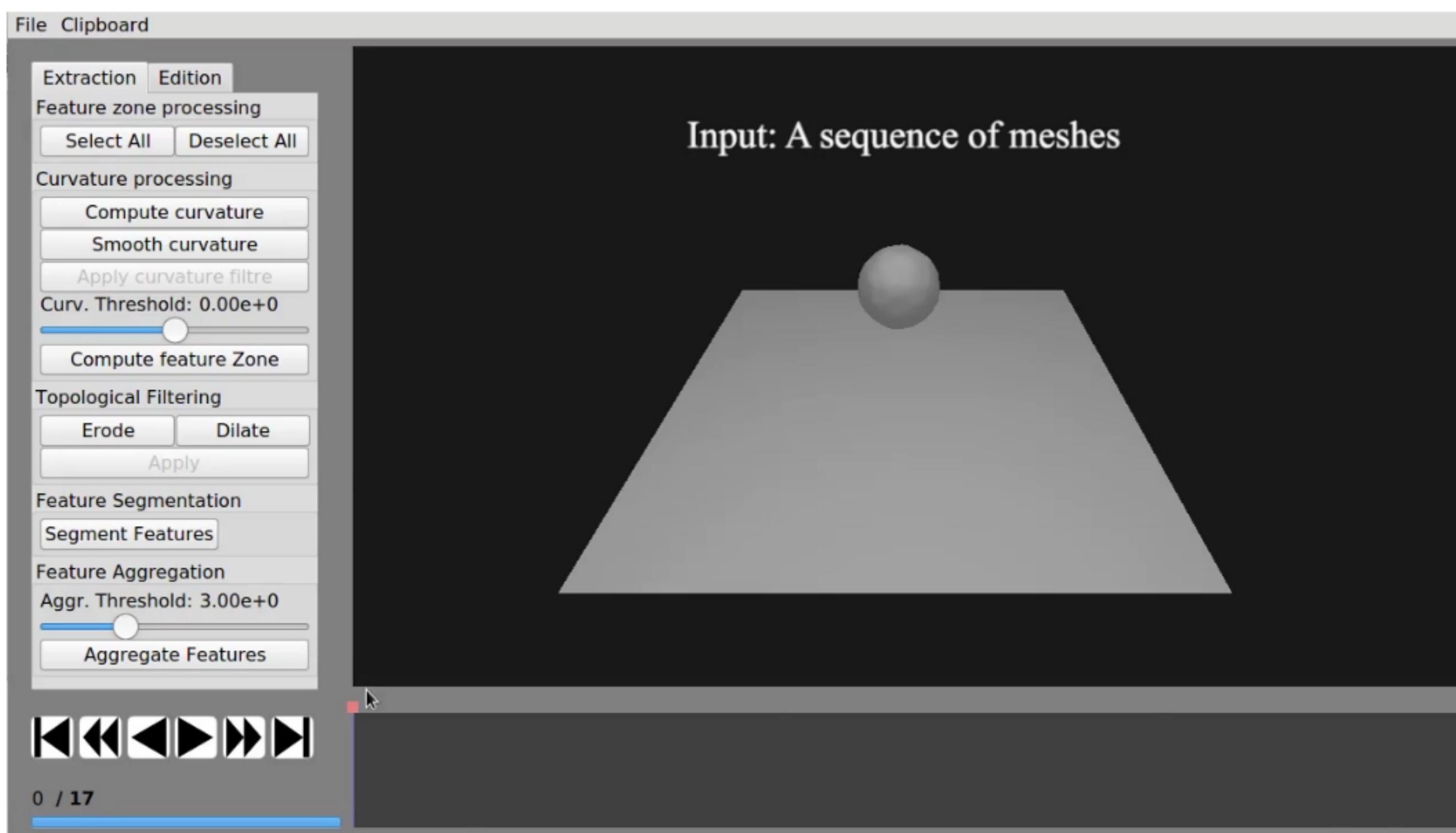
- + Pas de re-simulation : Édition/Combinaison d'animations existantes
- + Outils simples : Copier,Coller
- + Méthode indépendante du type de simulation : SPH, FLIP, ...

# Extraction des *caractéristiques*



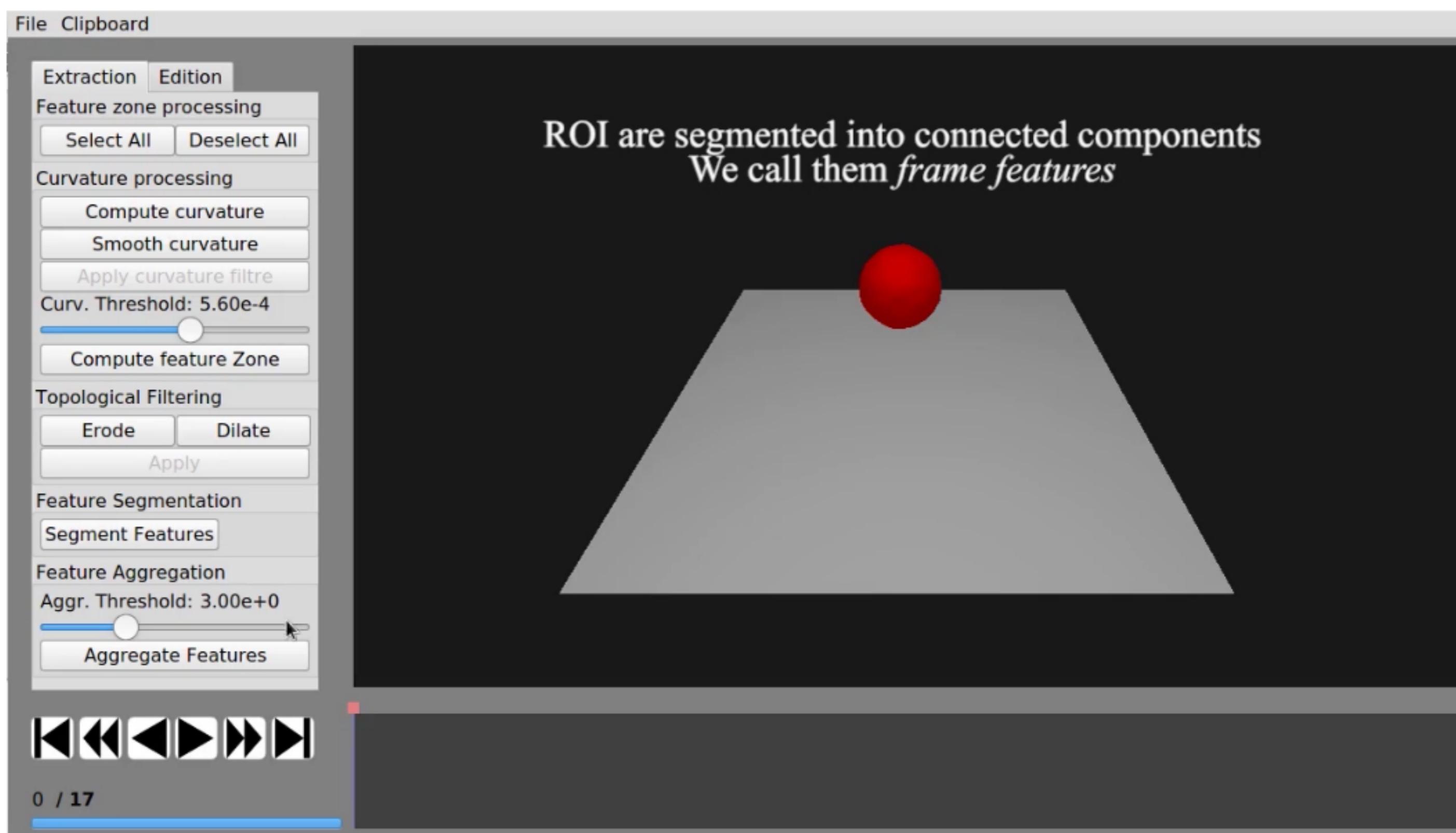
# Détection

Marquage des sommets visuellement intéressants



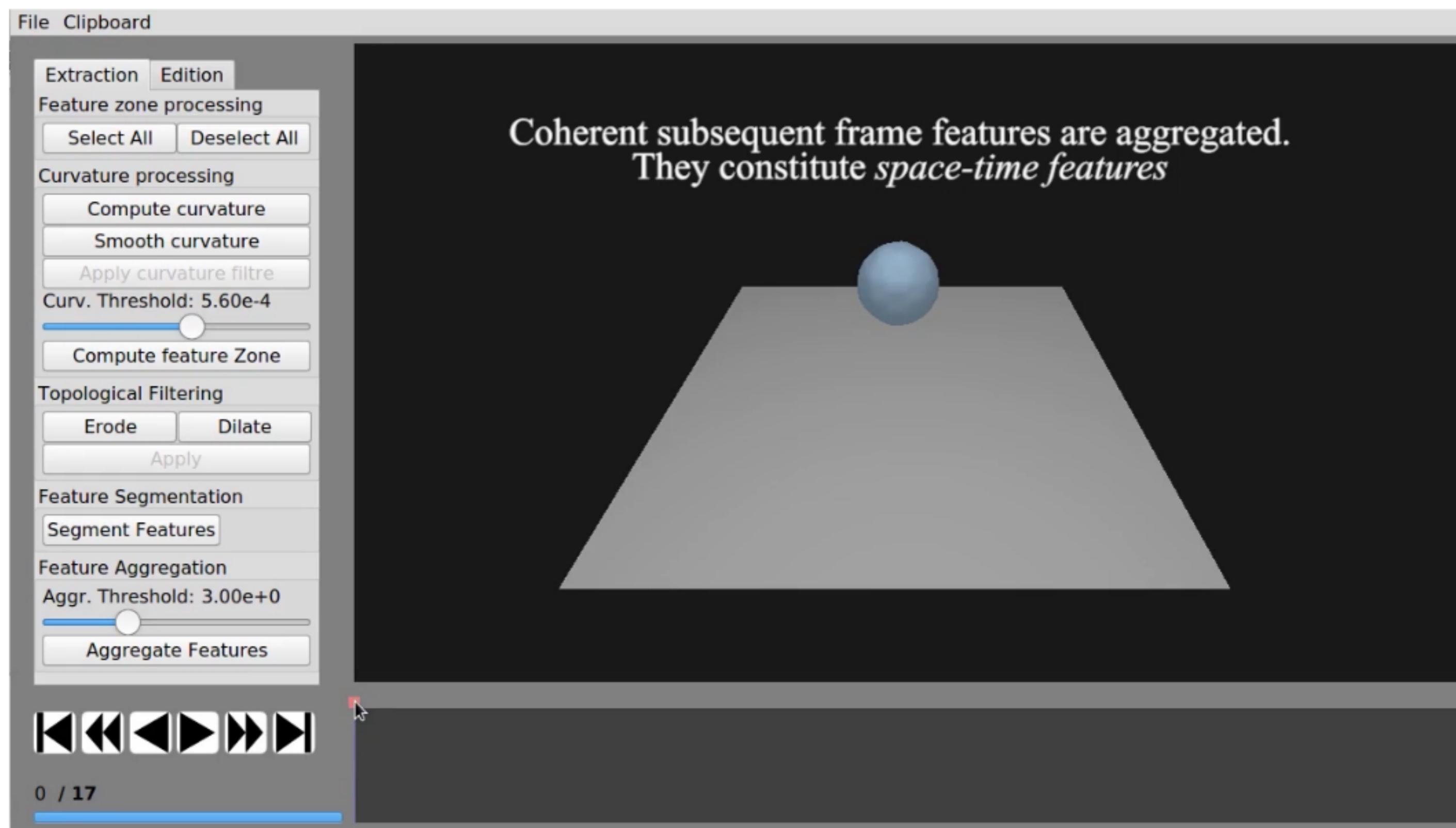
# Segmentation

Regroupement en régions d'intérêt



# Aggrégation

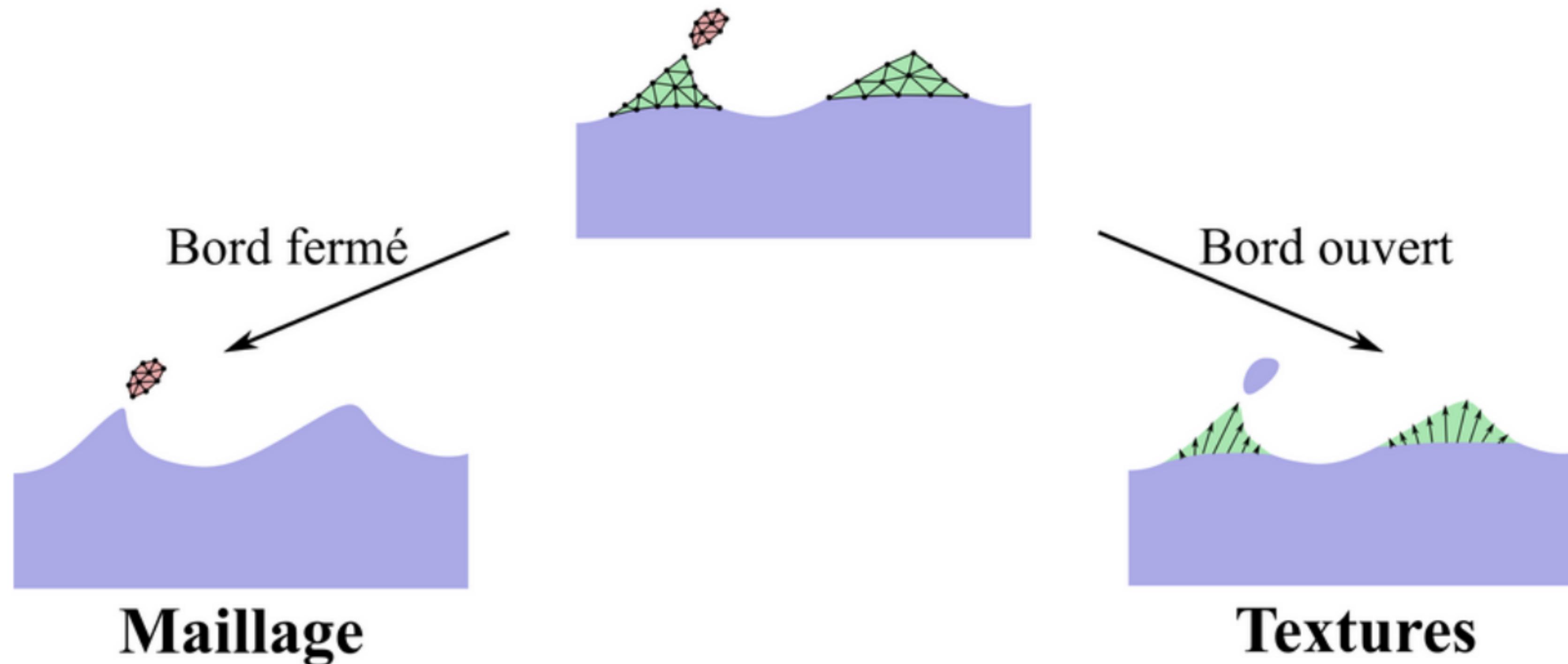
Combinaison des régions d'intérêt en *caractéristiques*



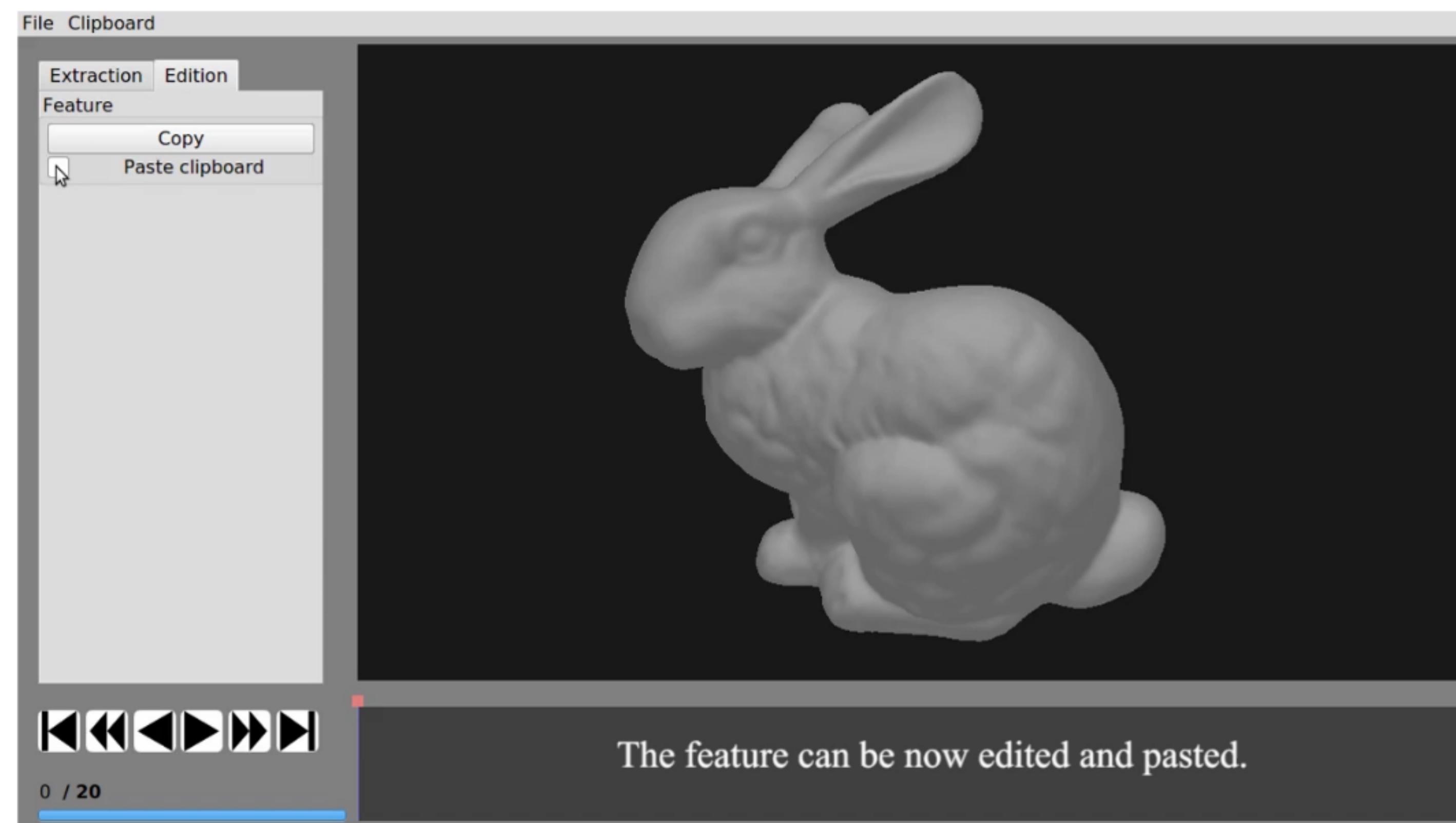
# Représentation des *caractéristiques*

Indépendante de l'animation

Régions d'intérêts = {Sommets}



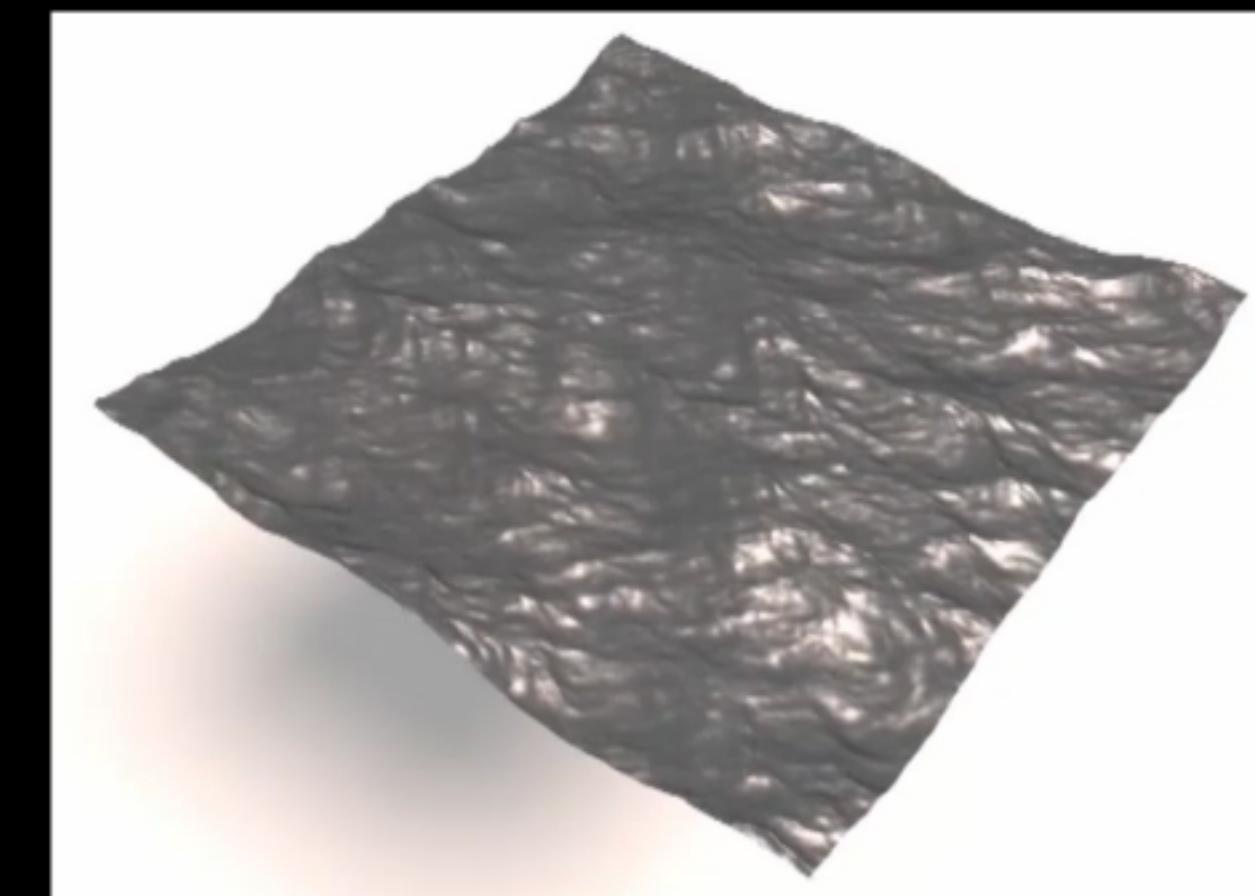
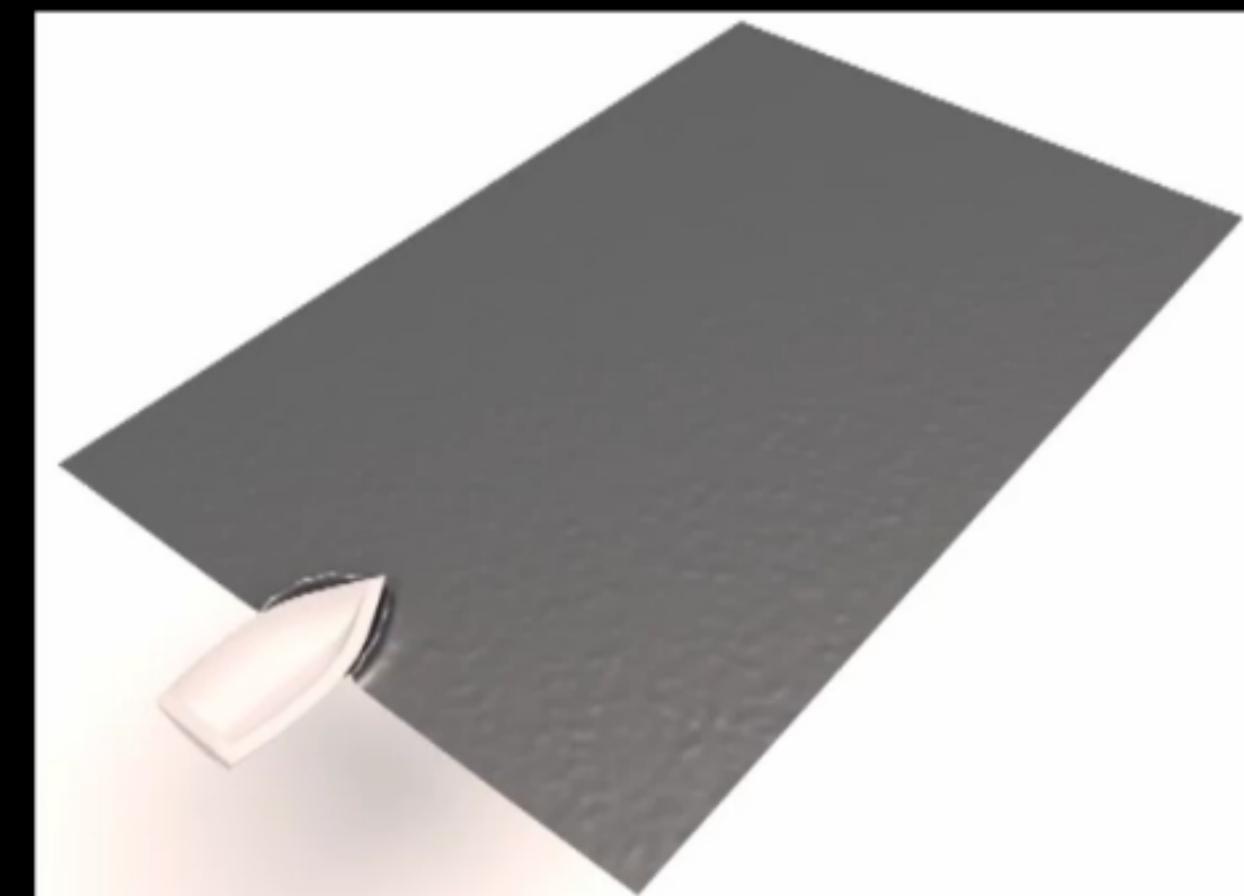
# Manipulation des caractéristiques



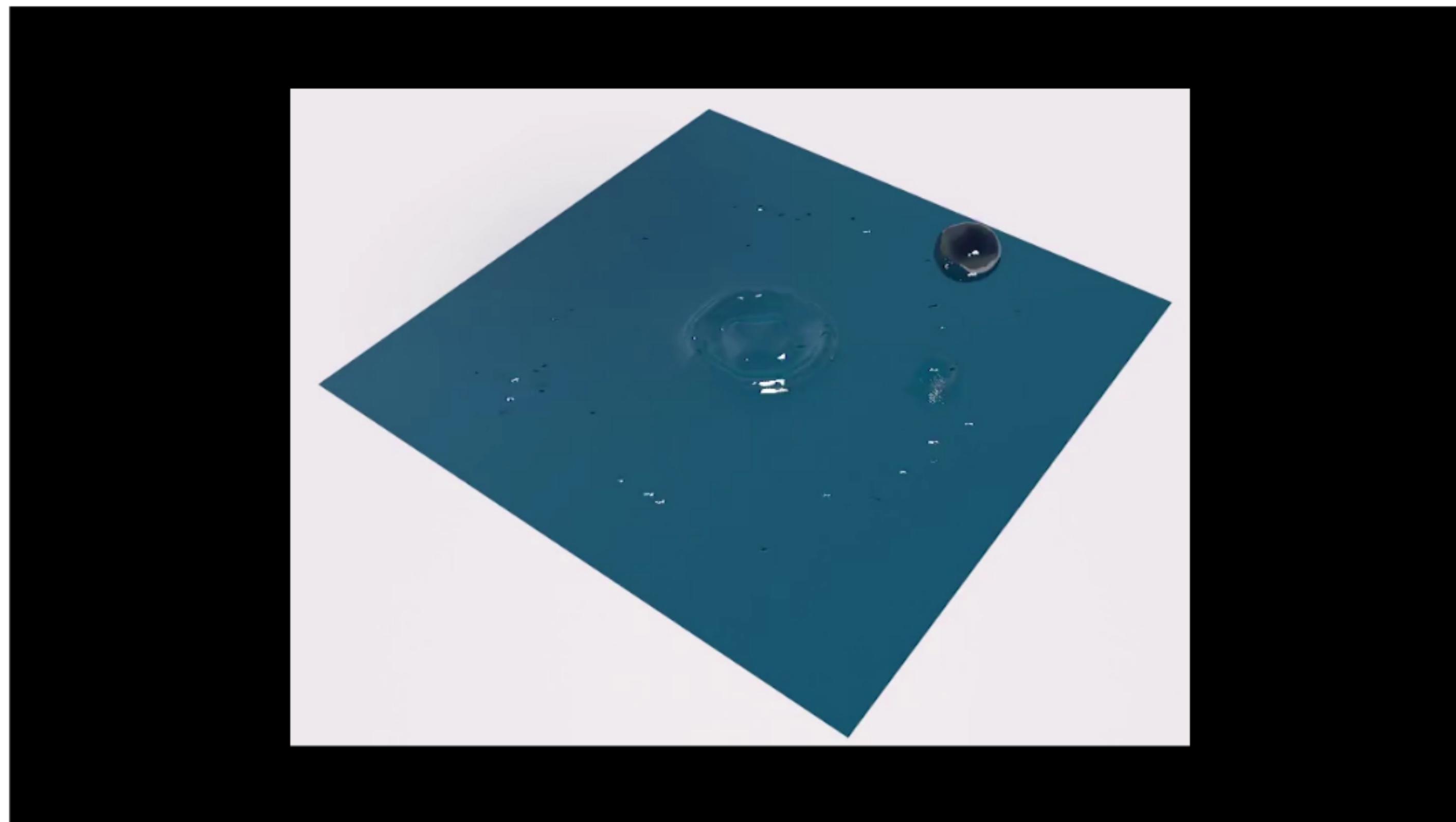
- Transformations affines
- Amplitude de déformation
- Édition de trajectoire
- Re-mappage temporel

# Résultats

Input animations



# Résultats



# Synthèse

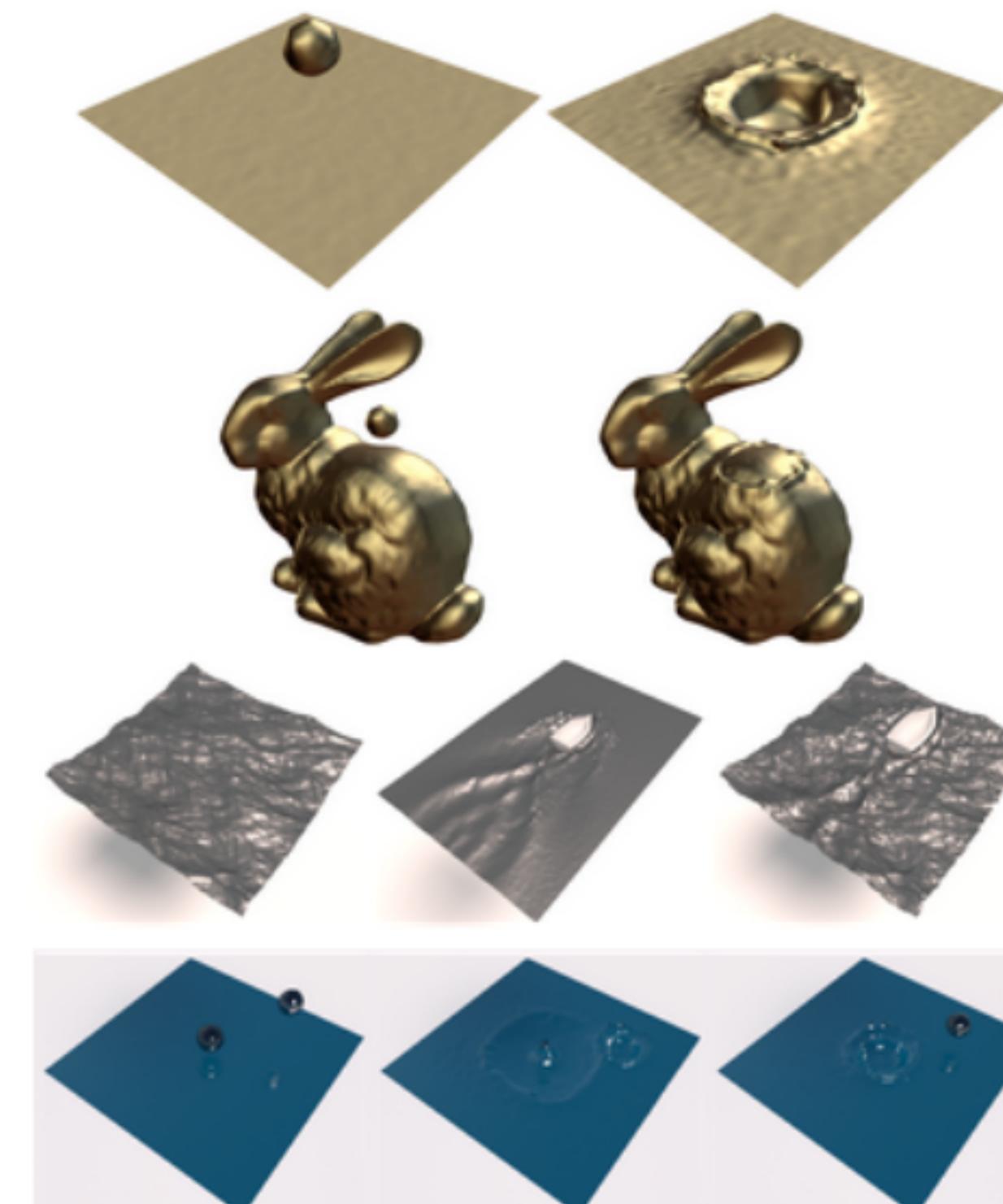
Édition interactive et simple d'animations de liquide

## Contributions

- Extraction de caractéristique cohérente
- Outils de sélection, d'édition, d'insertion

## Limitations & perspectives

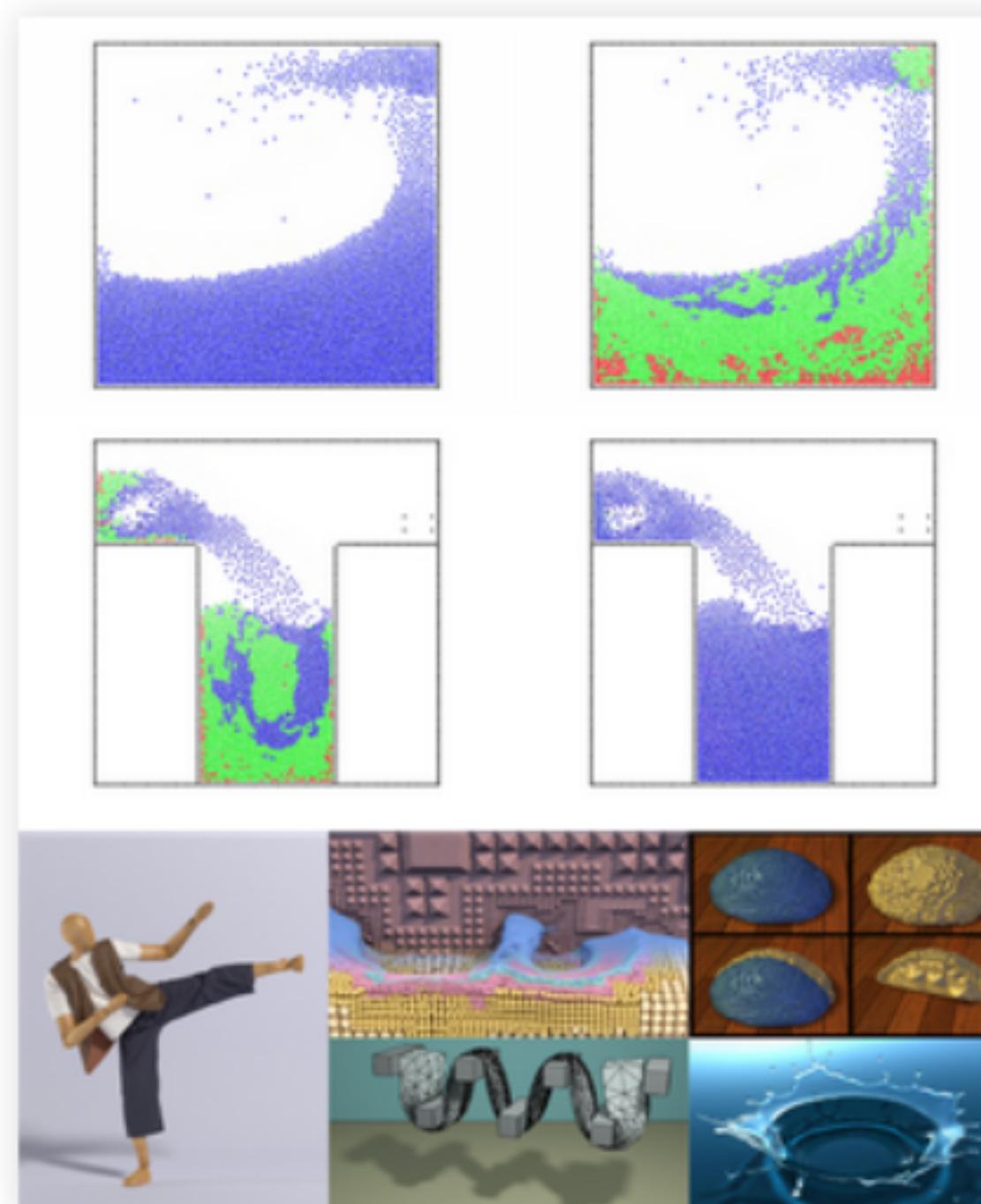
- Sélection semi-automatique
- Édition rigide



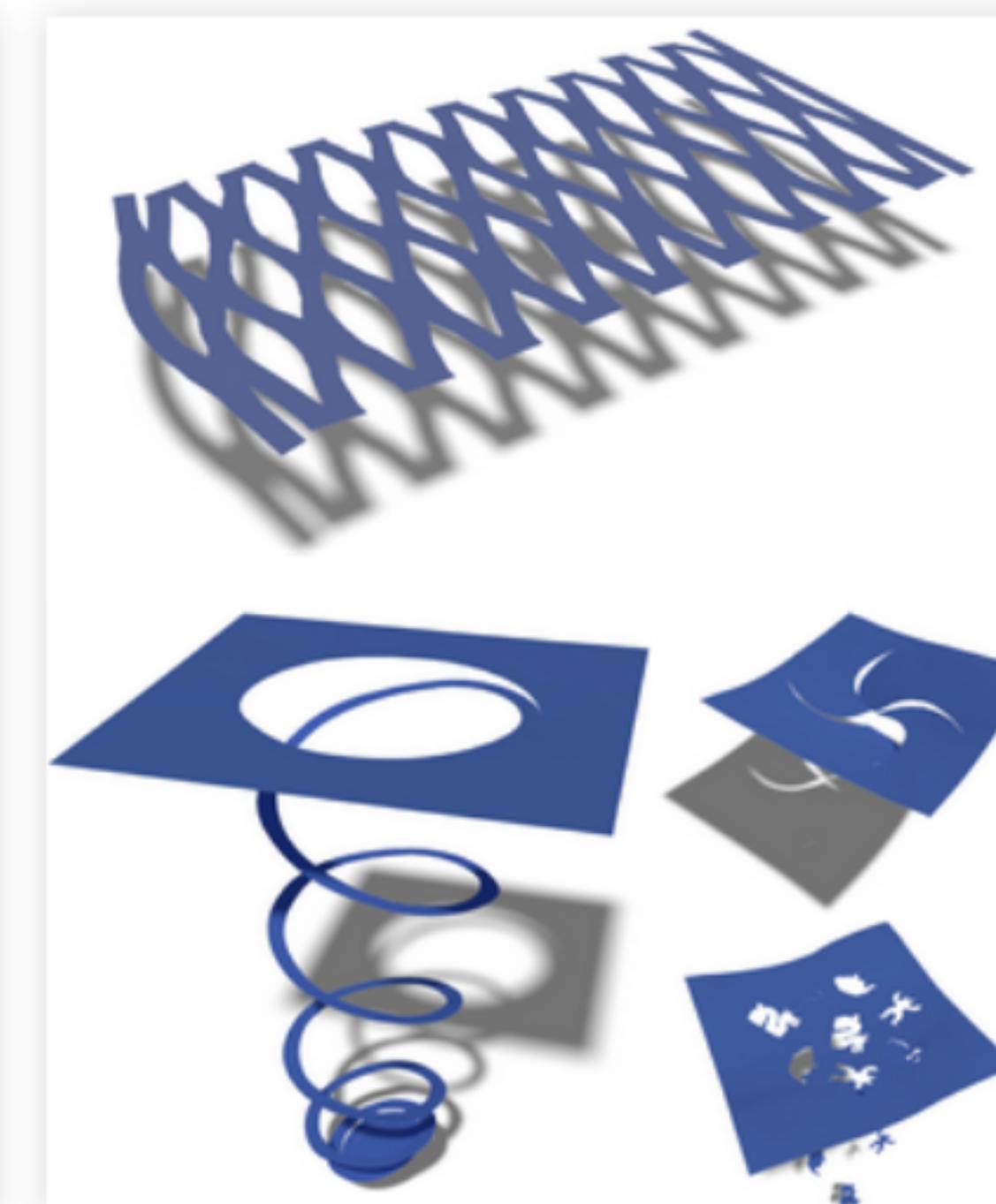
[Manteaux, Vimont, Wojtan, Rohmer, Cani, MIG'16]

# Synthèse

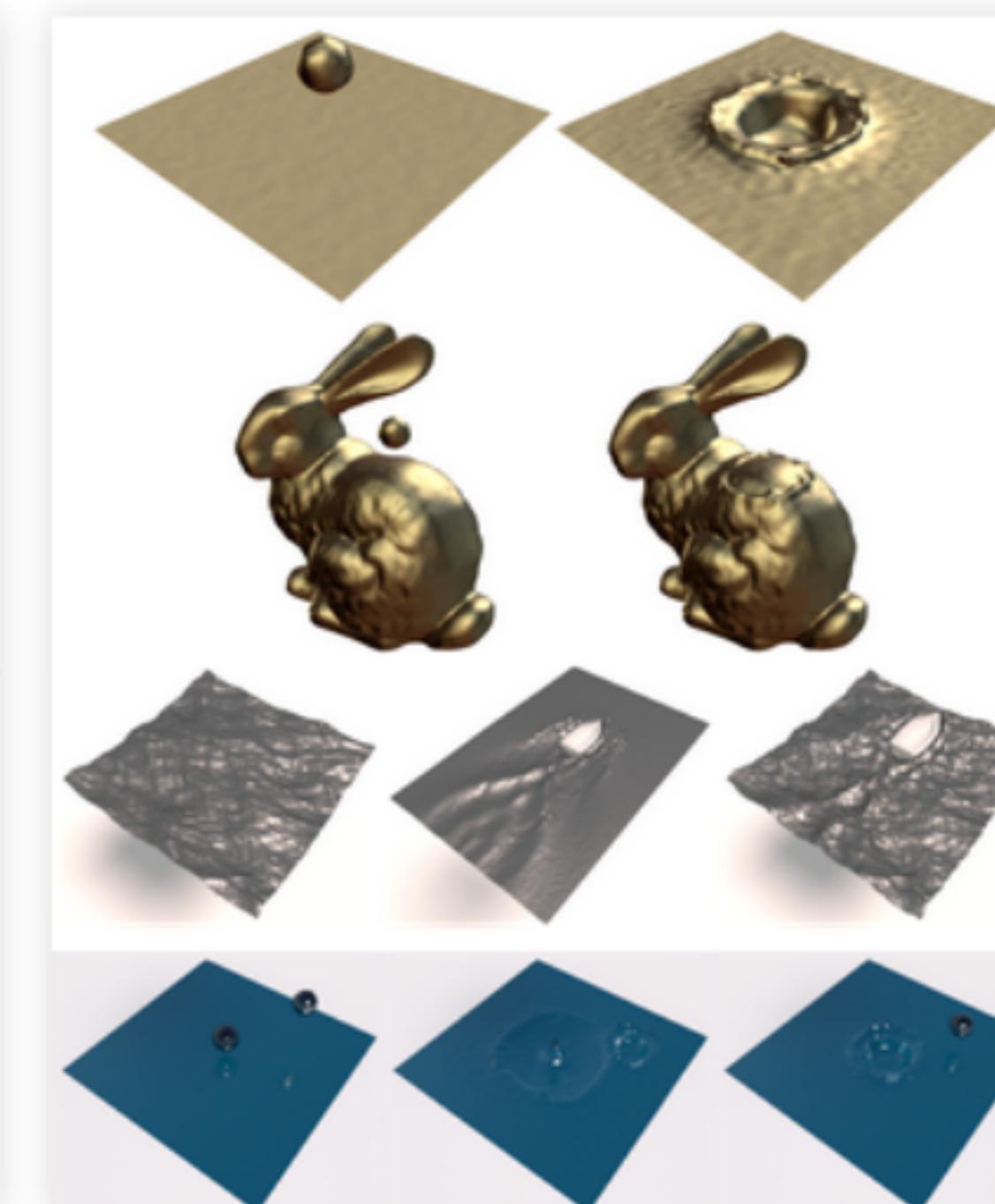
Modèles adaptatifs



Découpe d'objets fins  
déformables

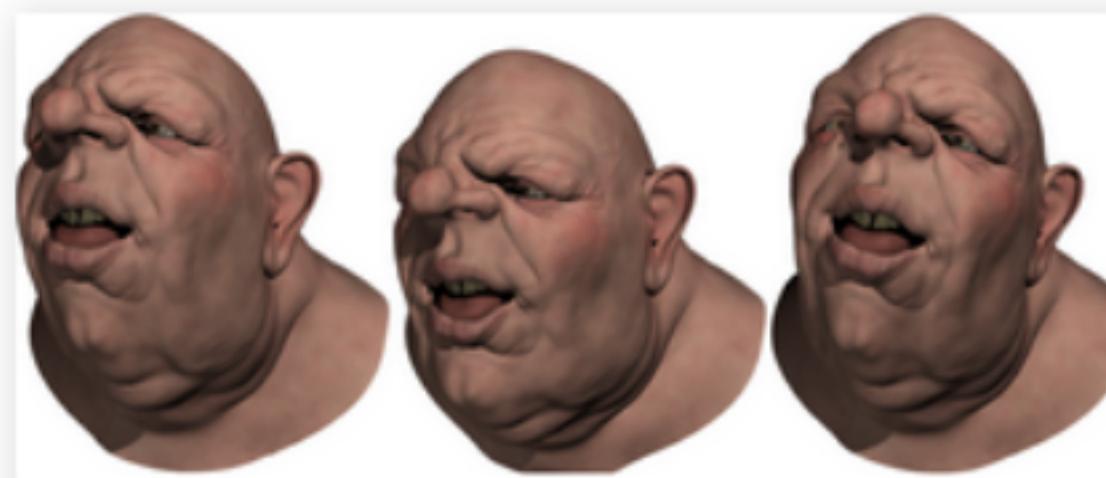


Édition d'animation de  
liquide

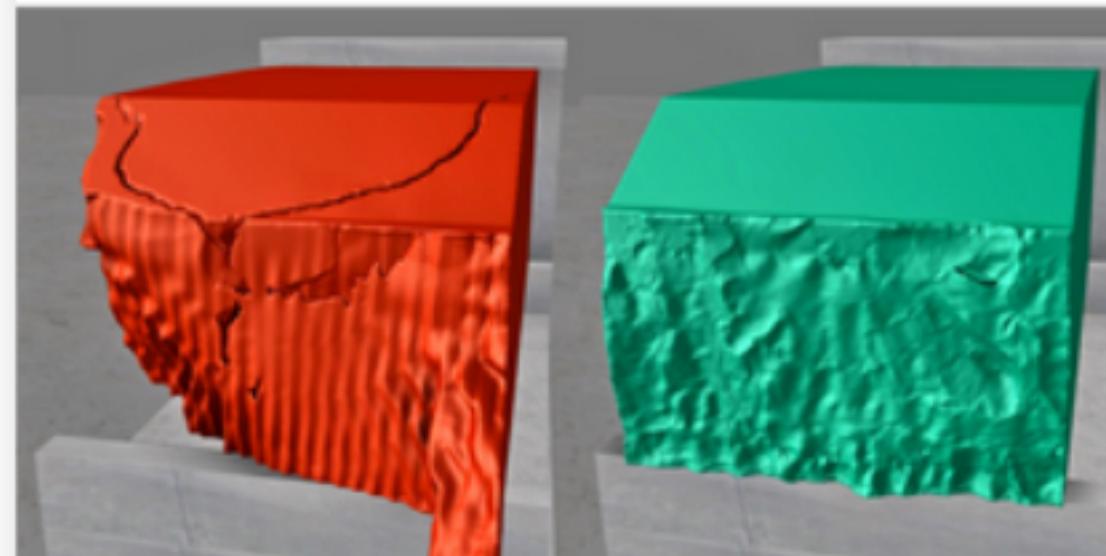


# Perspectives

Modèles réduits



[Kim and James, 2009]



[Hahn and Wojtan, 2015]

Enrichissement  
de simulation



[Chen et al. 2014]



[Lejembel et al. 2015]

Réalisme et expressivité



[An american tail, Amblin, 1986]



[Ponyo, Ghibli, 2009]