

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



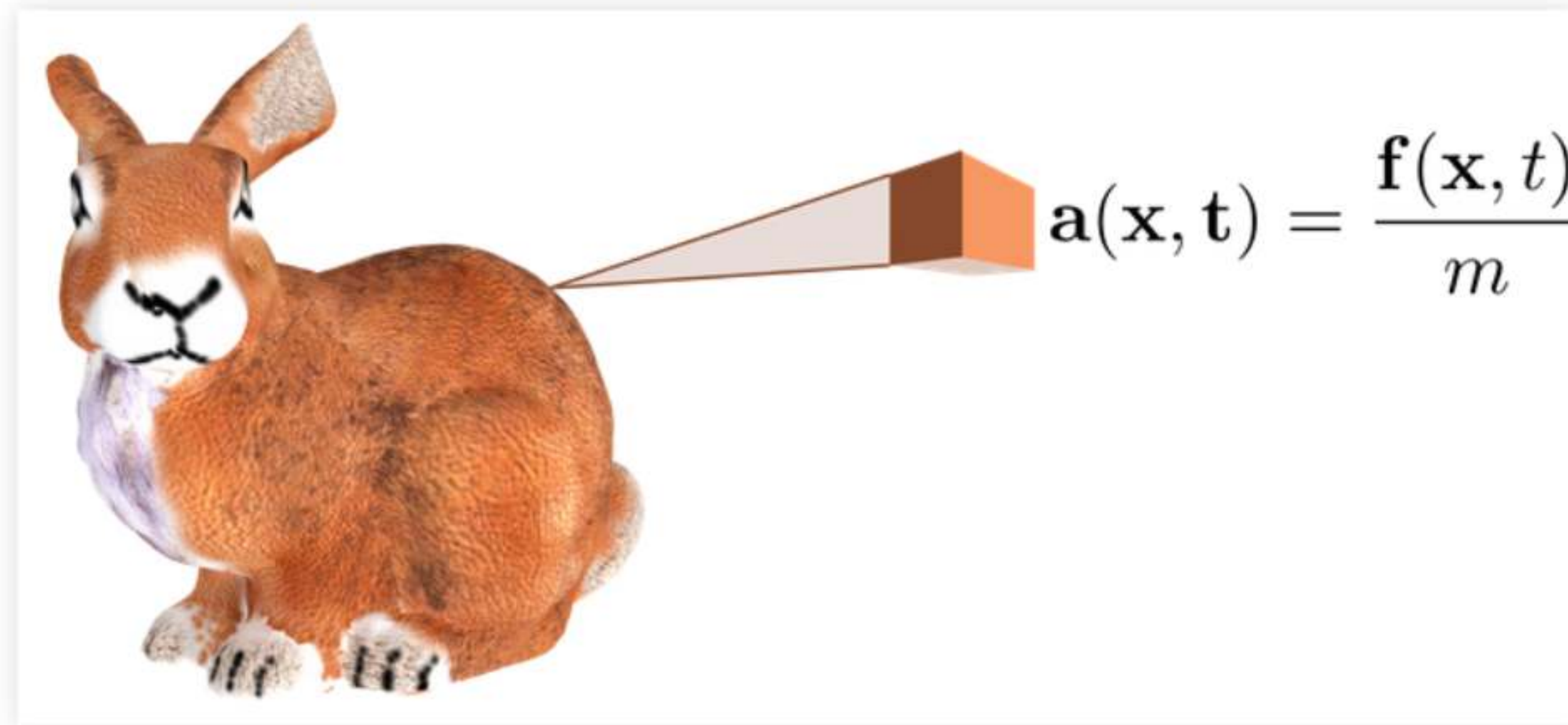
Frank Gehry

Immersion

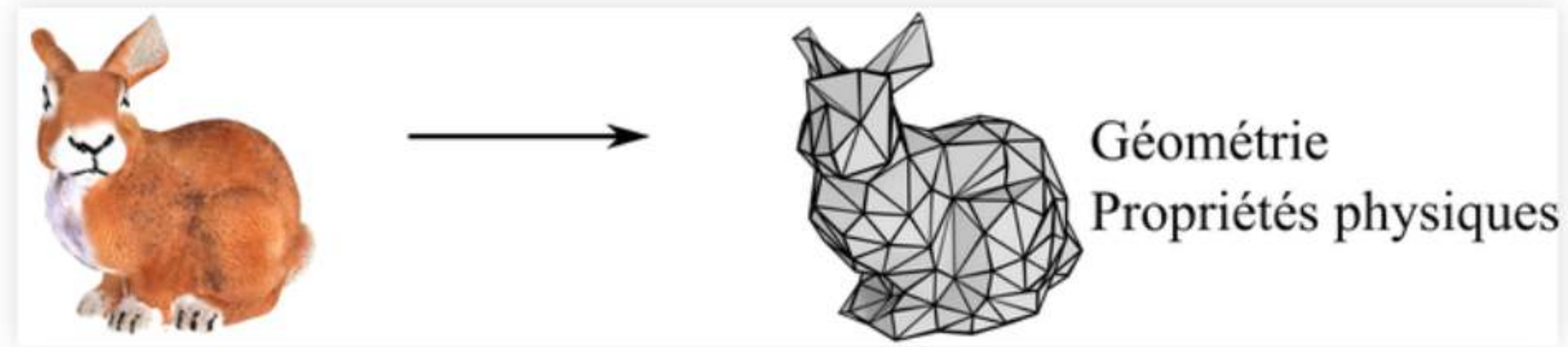
Conception + rapide

Contexte : Simulation physique

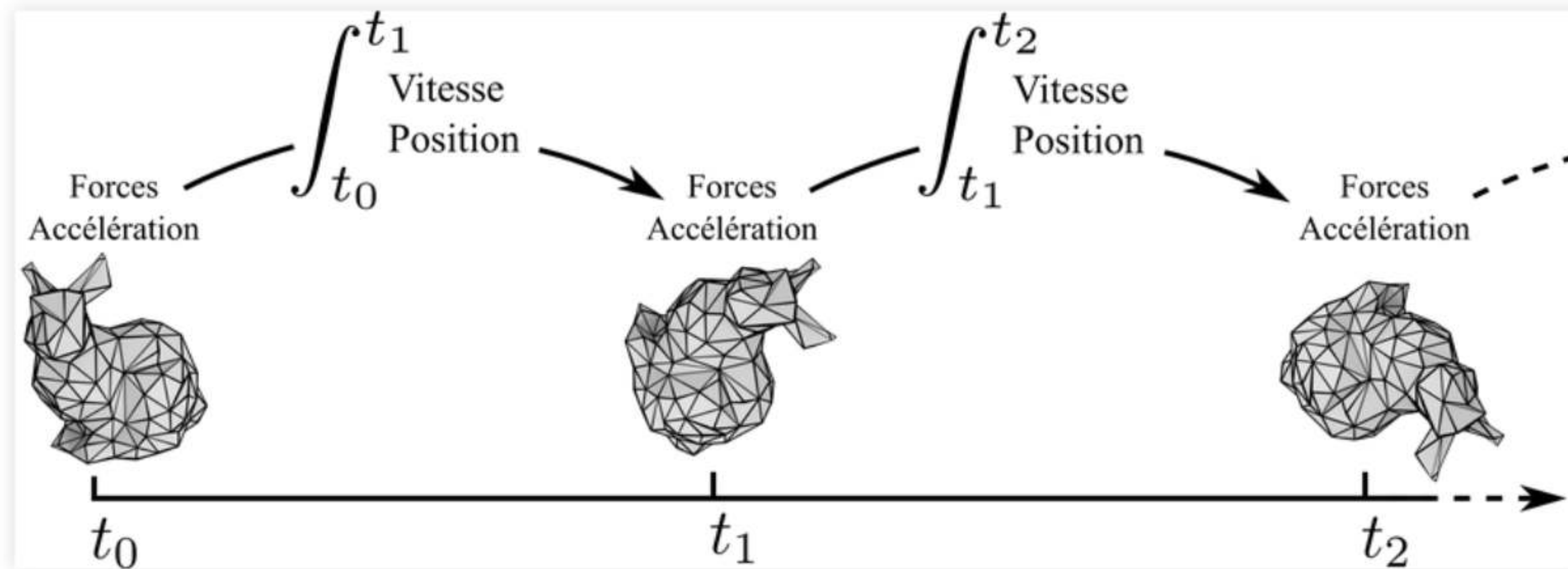
Approximer le comportement d'un objet



Contexte : Simulation physique



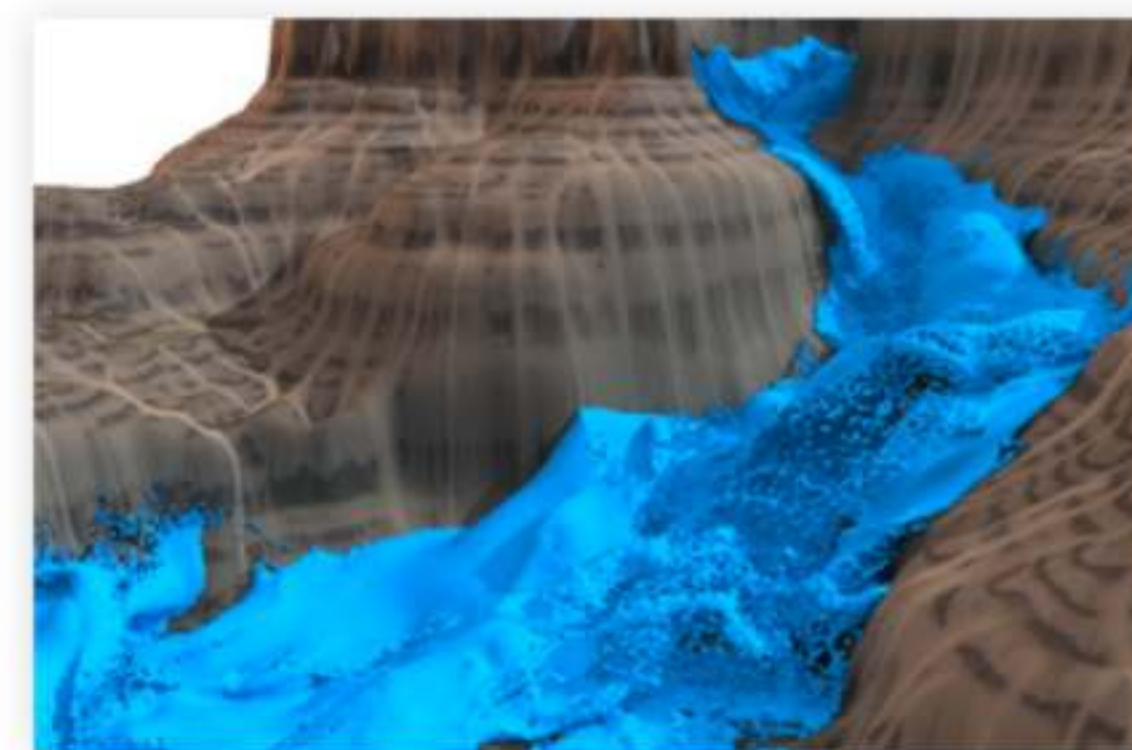
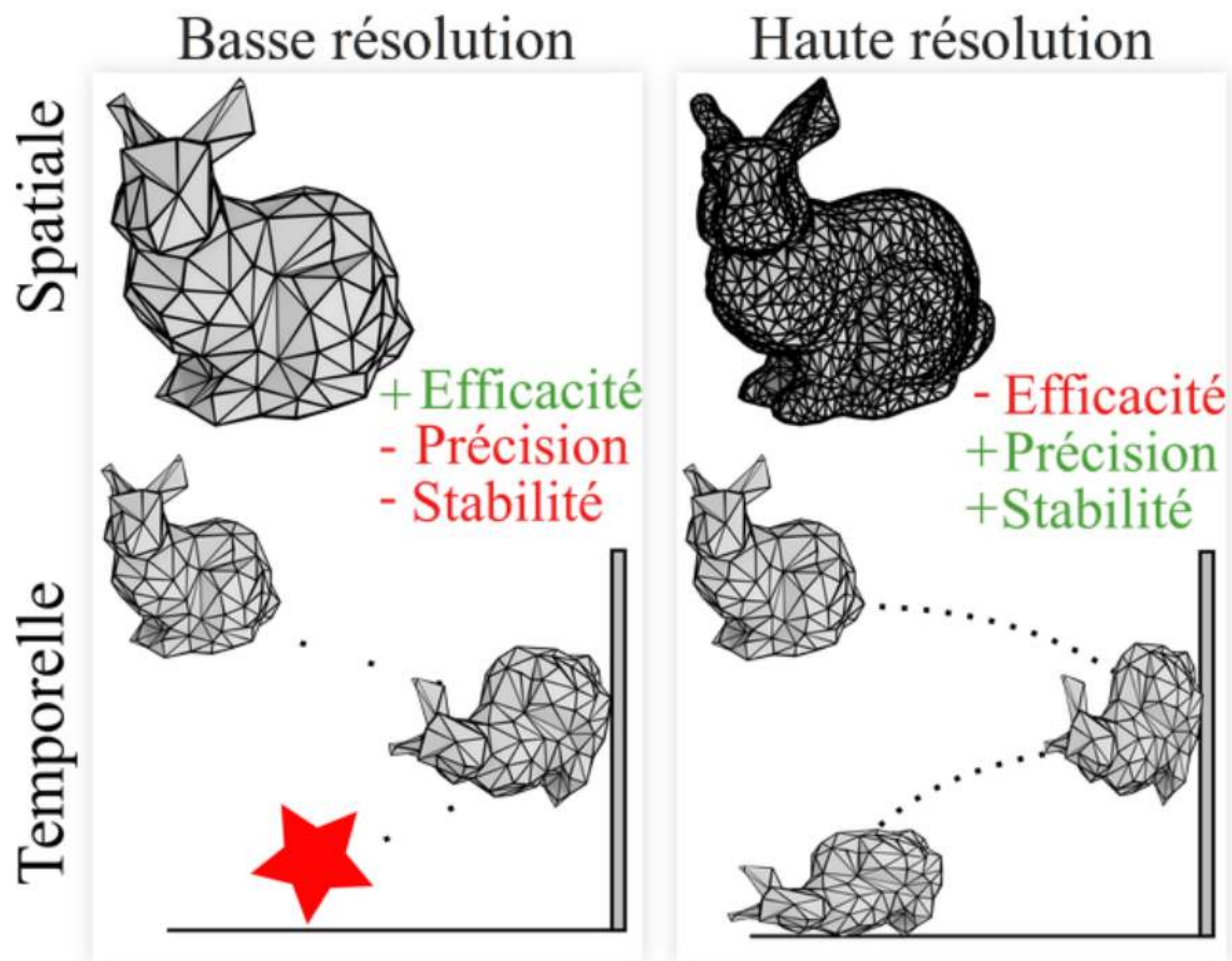
Discrétisation spatiale



Discrétisation temporelle

Défis en simulation physique

Complexité calculatoire

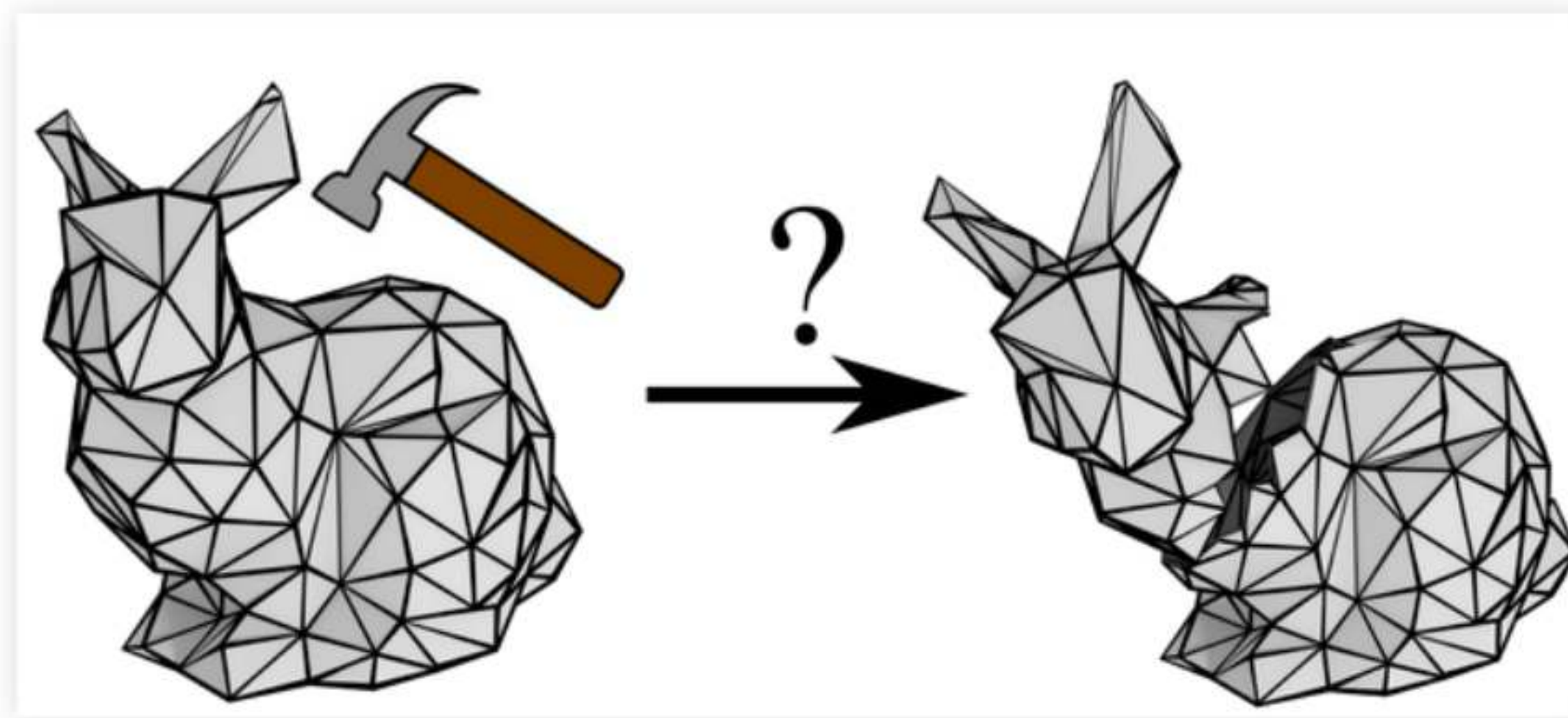


[Koschier et al. 2016]

20s simulation = 30h calcul

Défis en simulation physique

Modélisation efficace de changements topologiques



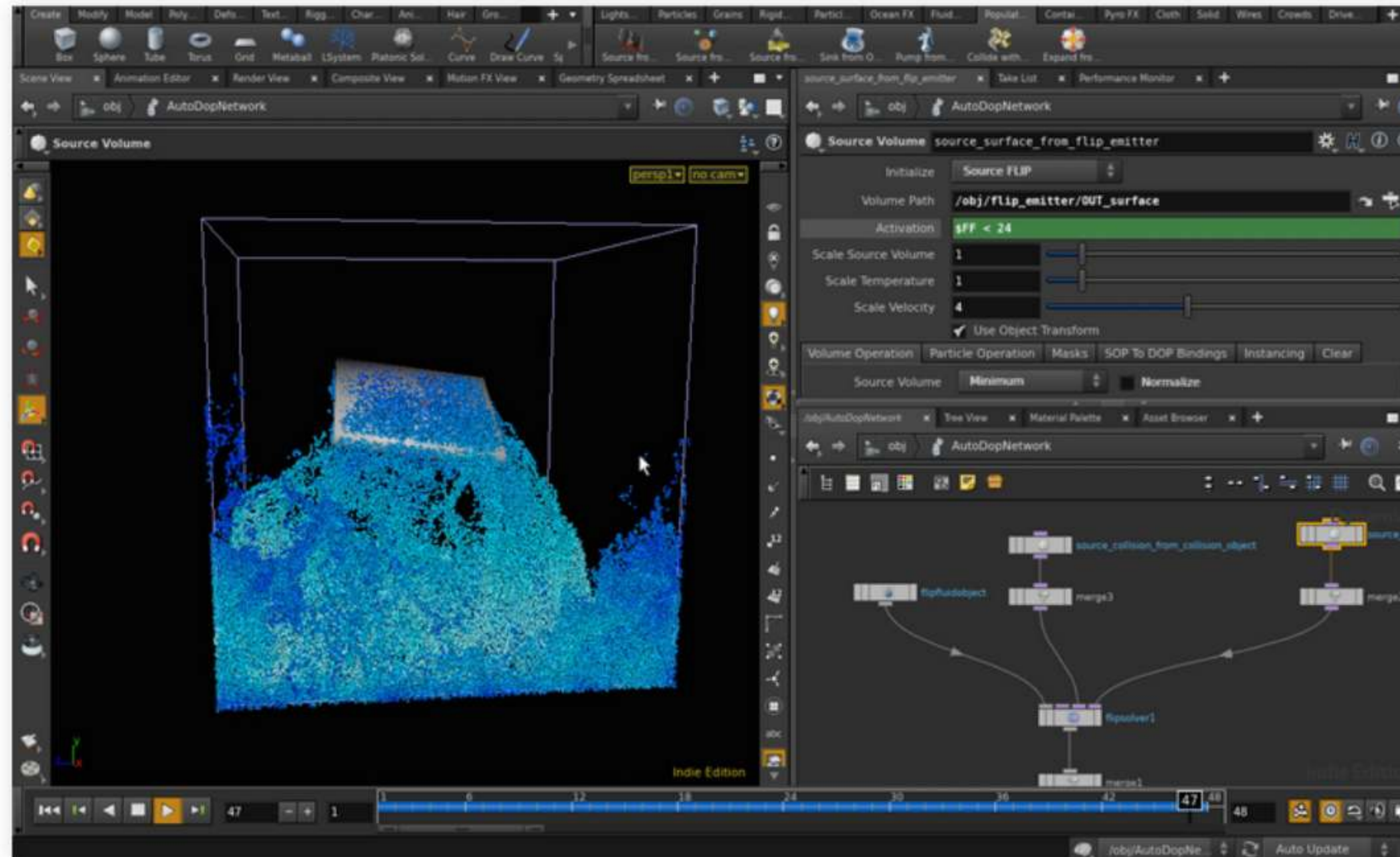
[Pfaff et al. 2014]

2s simulation = 1h calcul

Peu présent dans un contexte interactif

Défis en simulation physique

Contrôle intuitif

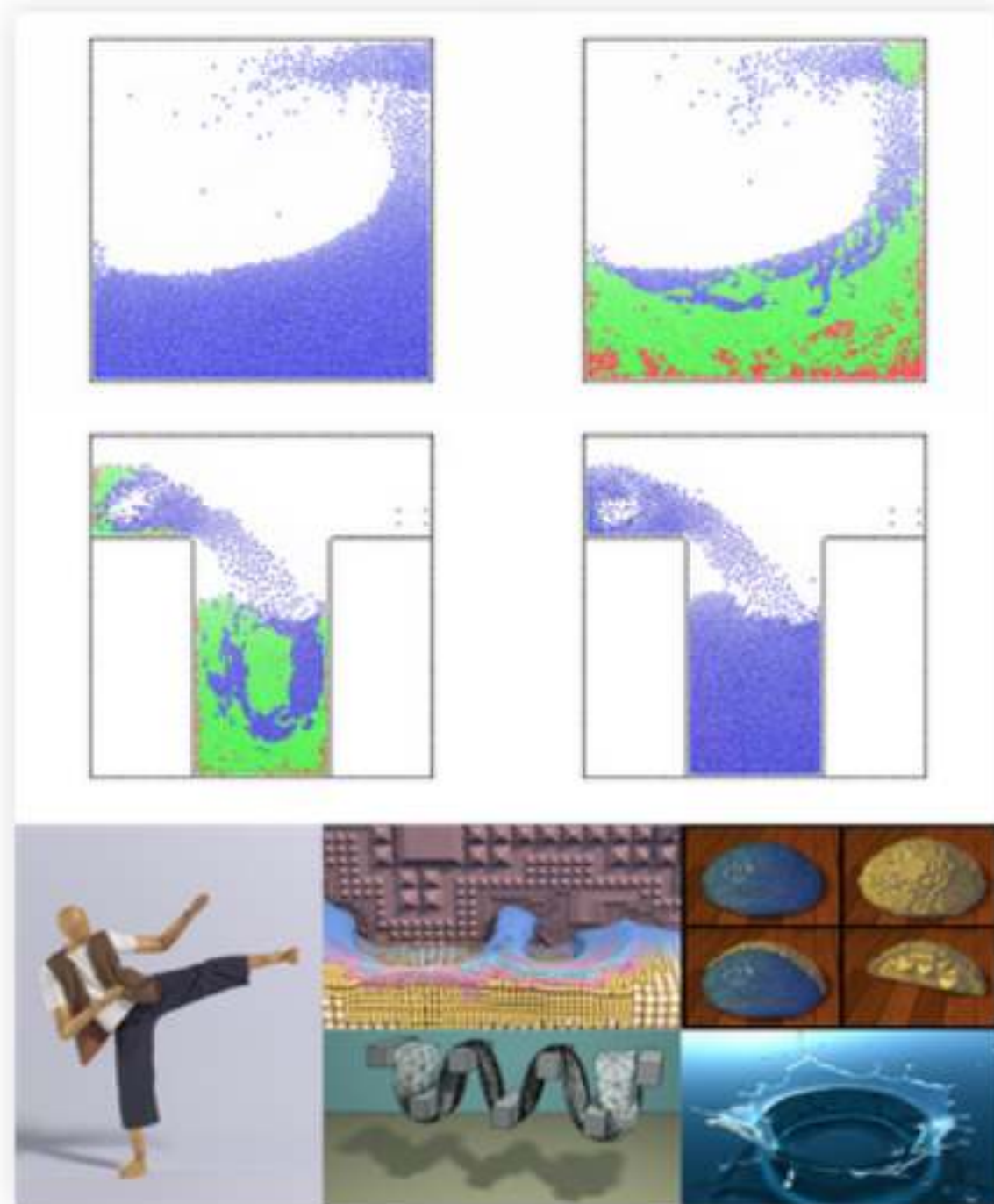


[Houdini, DreamWorks] **Interface peu intuitive, contrôle indirect, temps de calcul long**

Contributions de cette thèse

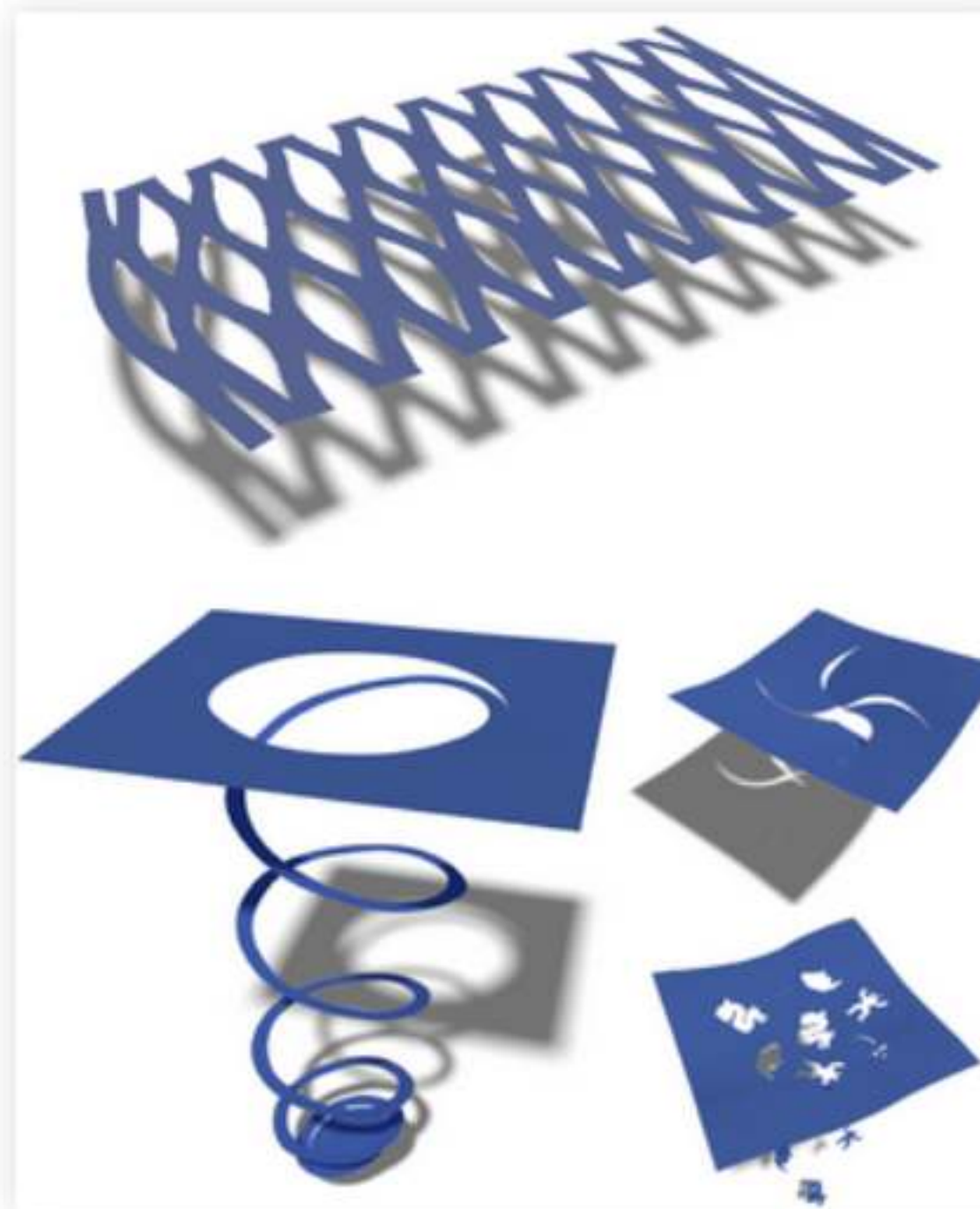
Complexité calculatoire

Modèle adaptatif



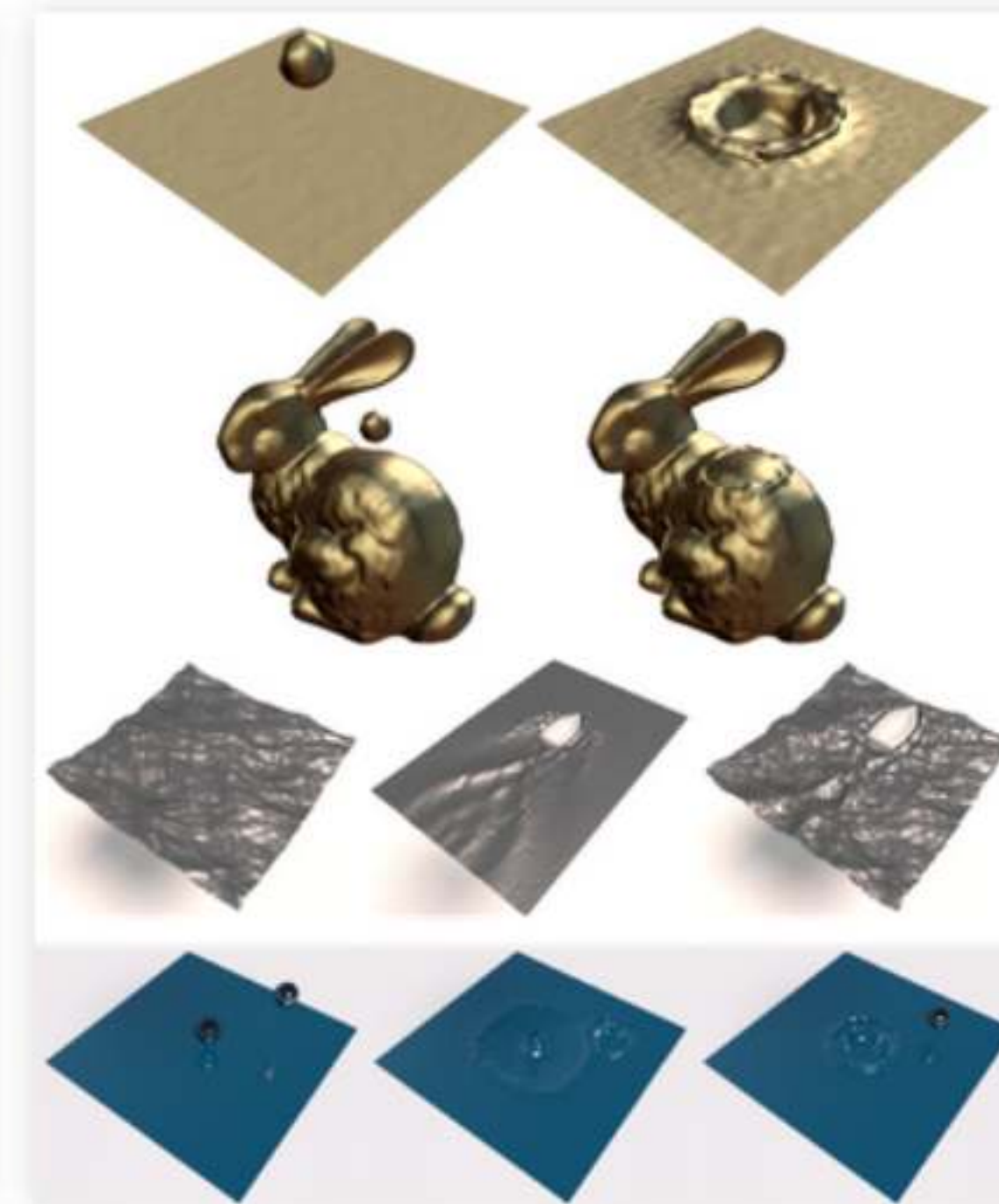
Changements
topologiques

Découpe interactive



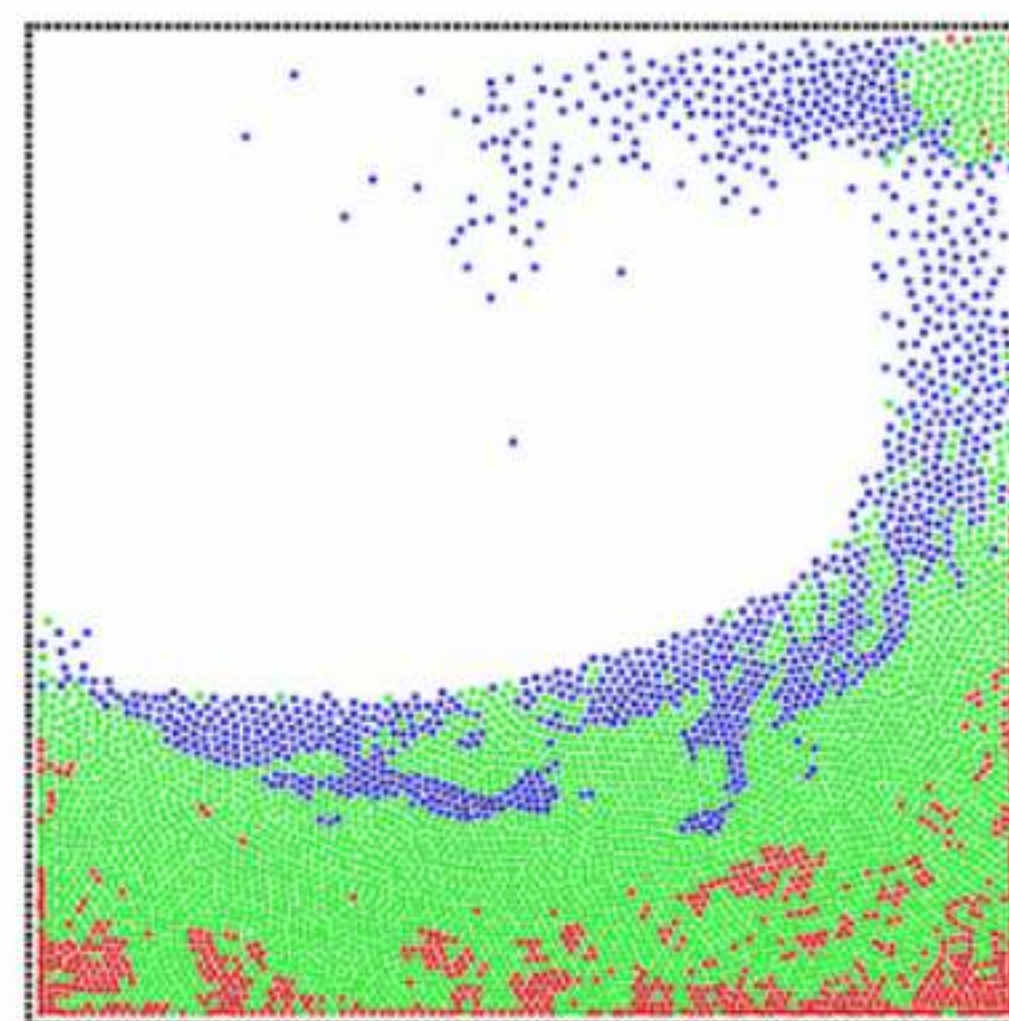
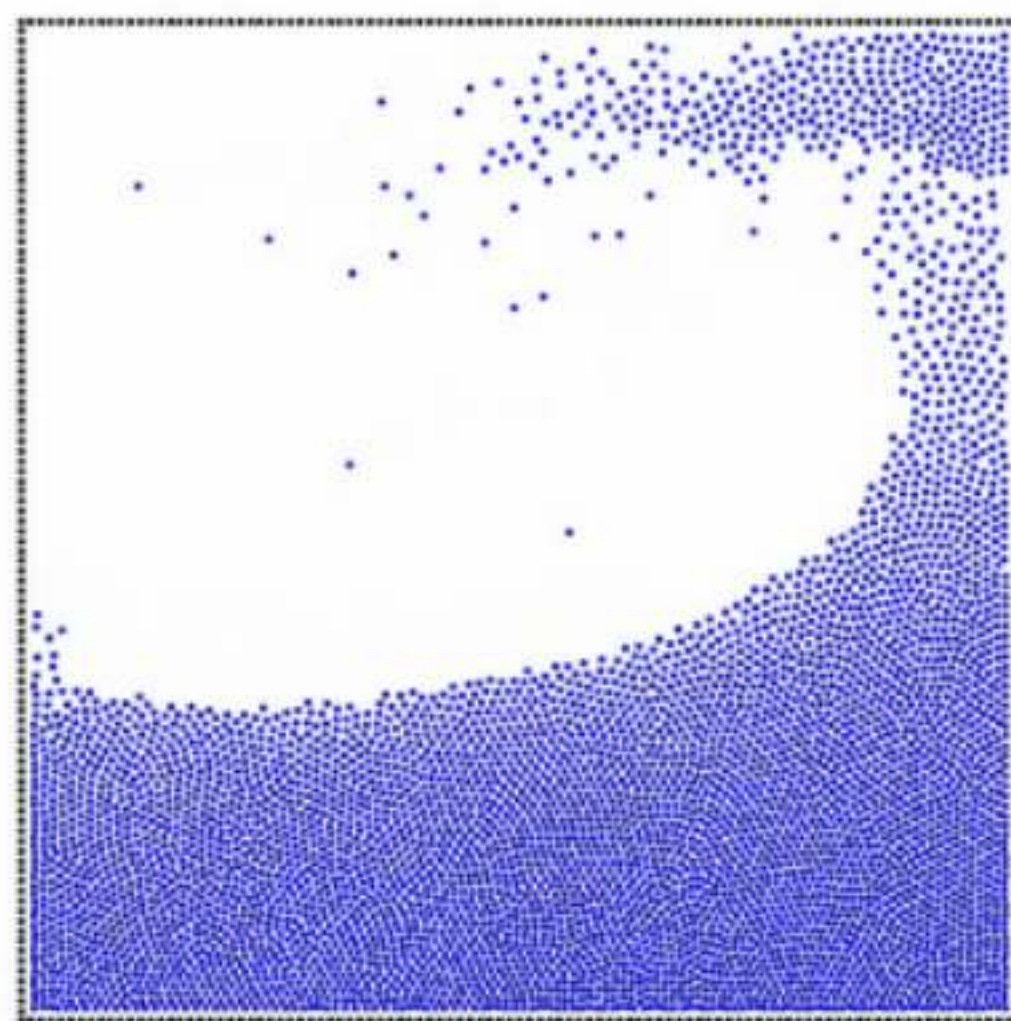
Contrôle intuitif

Sculpture d'animation



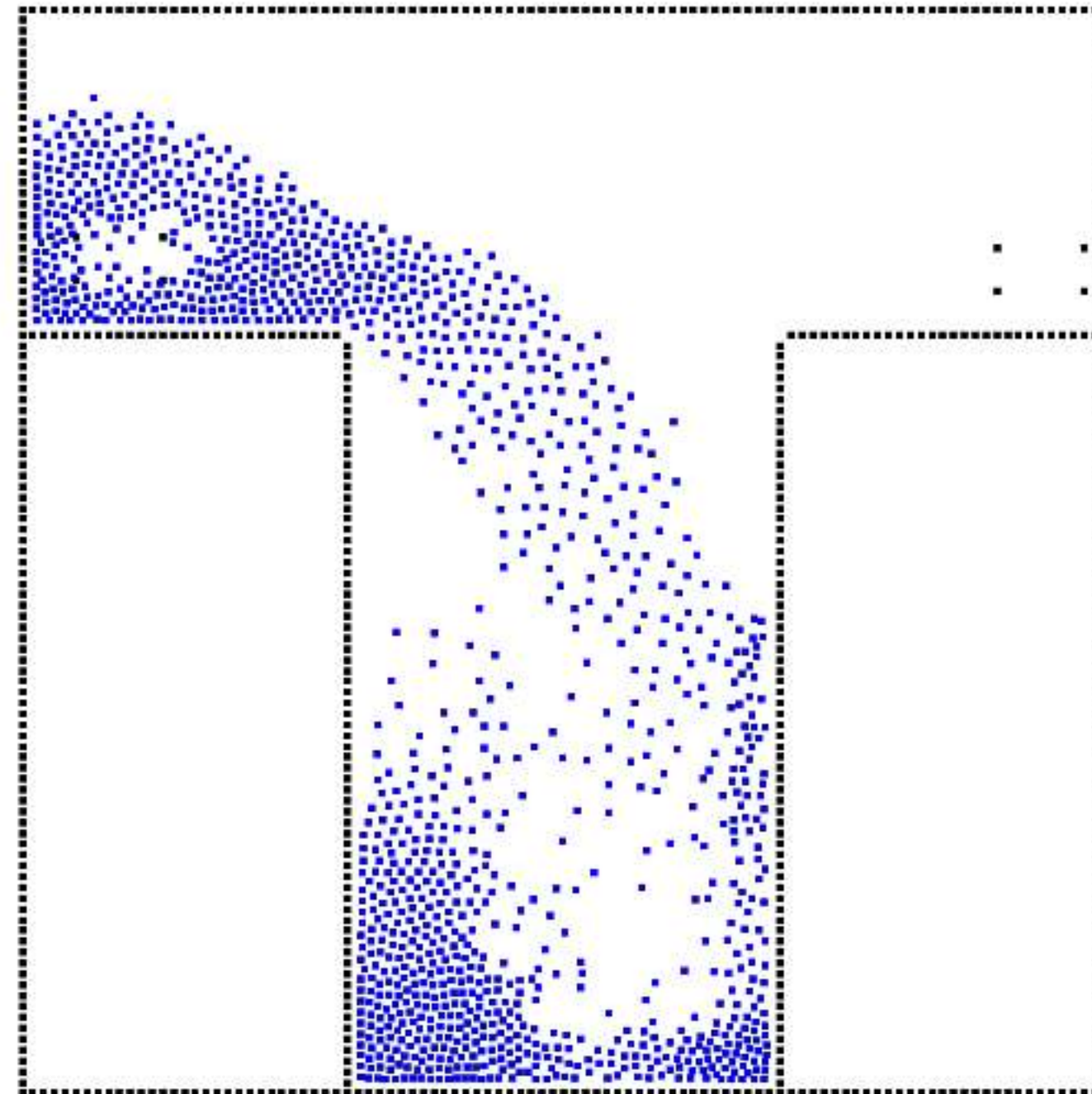
Adaptativité des modèles physiques

Extension de l'ARPS à l'informatique graphique



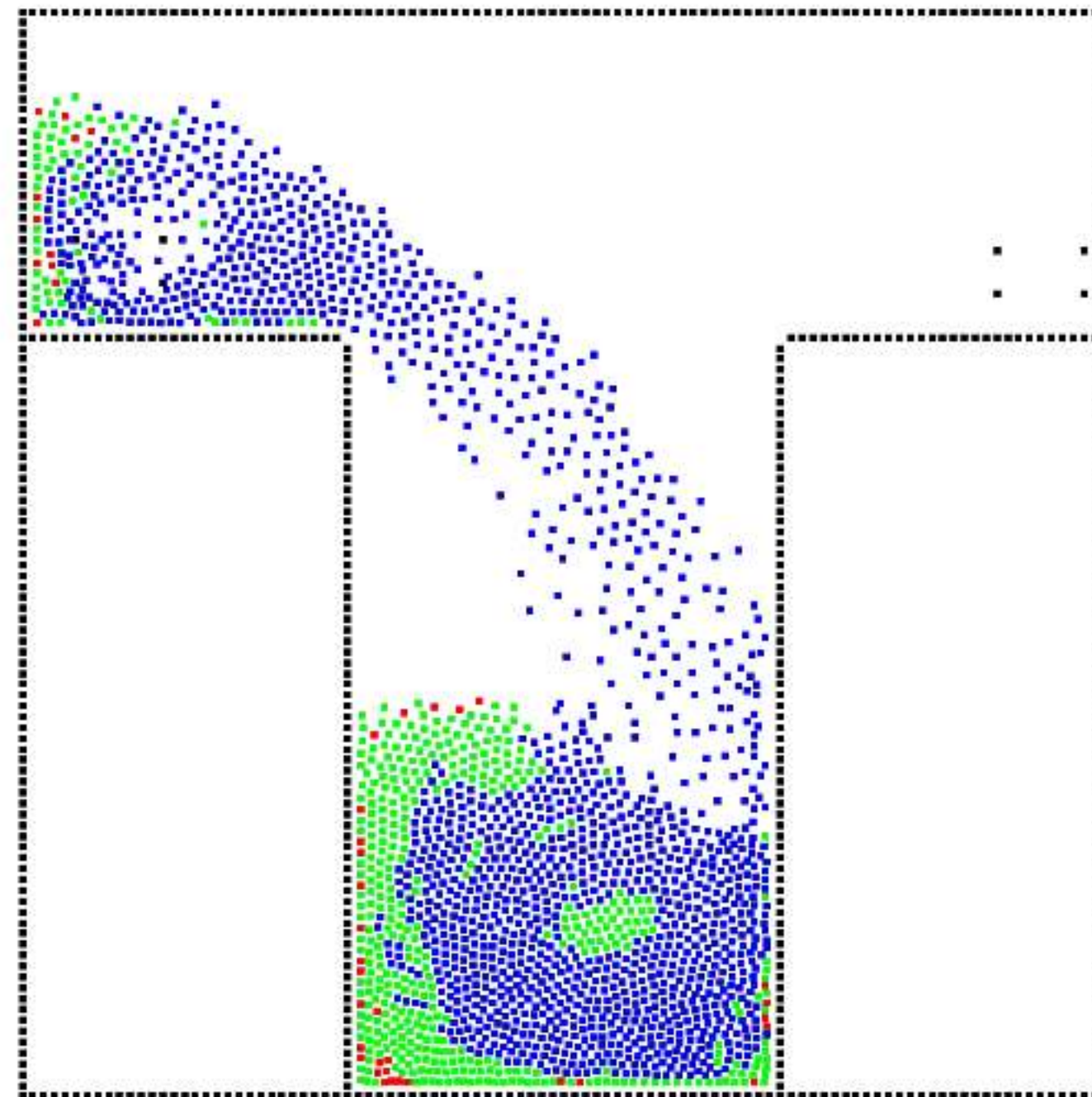
Motivations

Tant de calcul pour si peu de mouvement



Notre approche

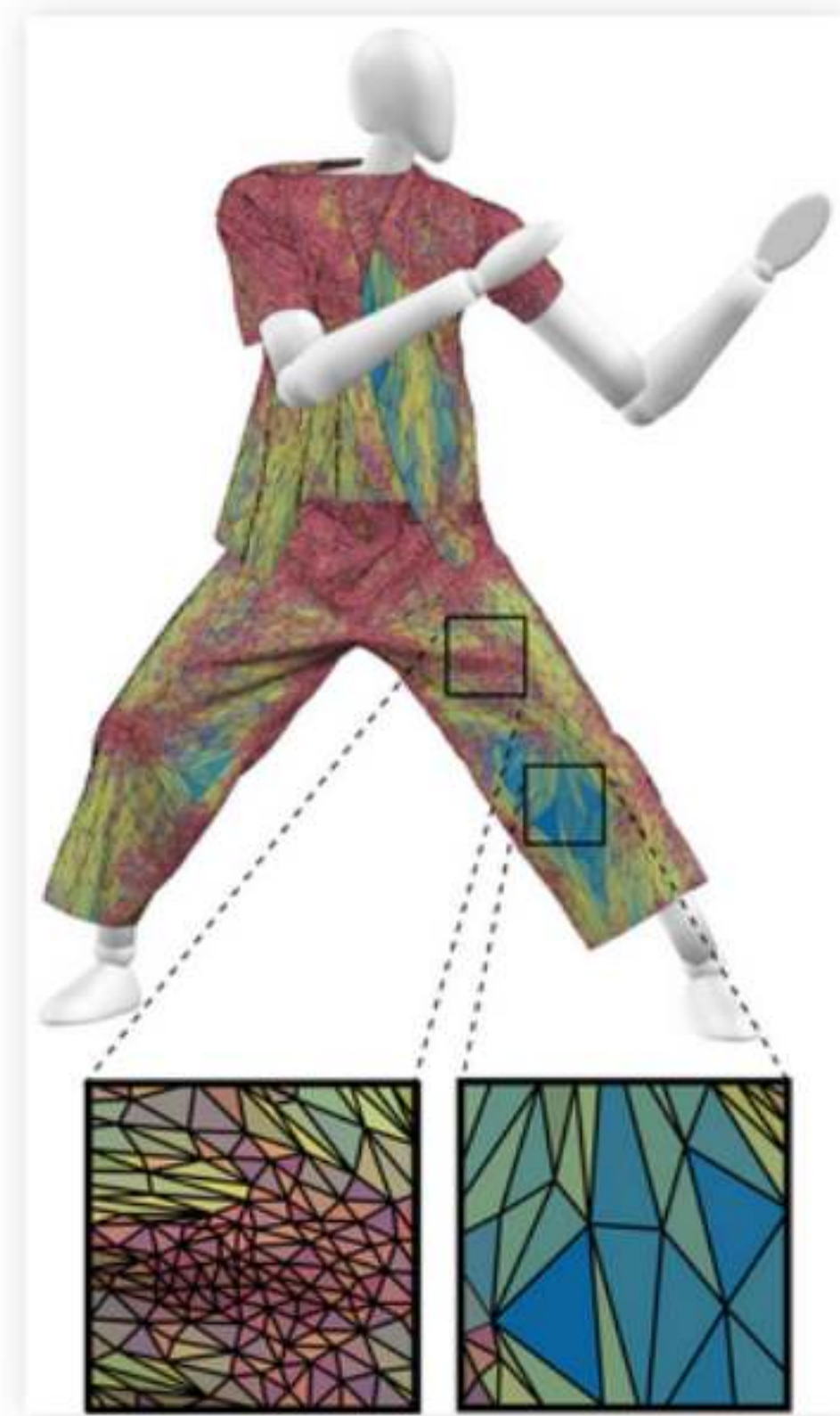
Concentrer les calculs dans les zones *dynamiques*



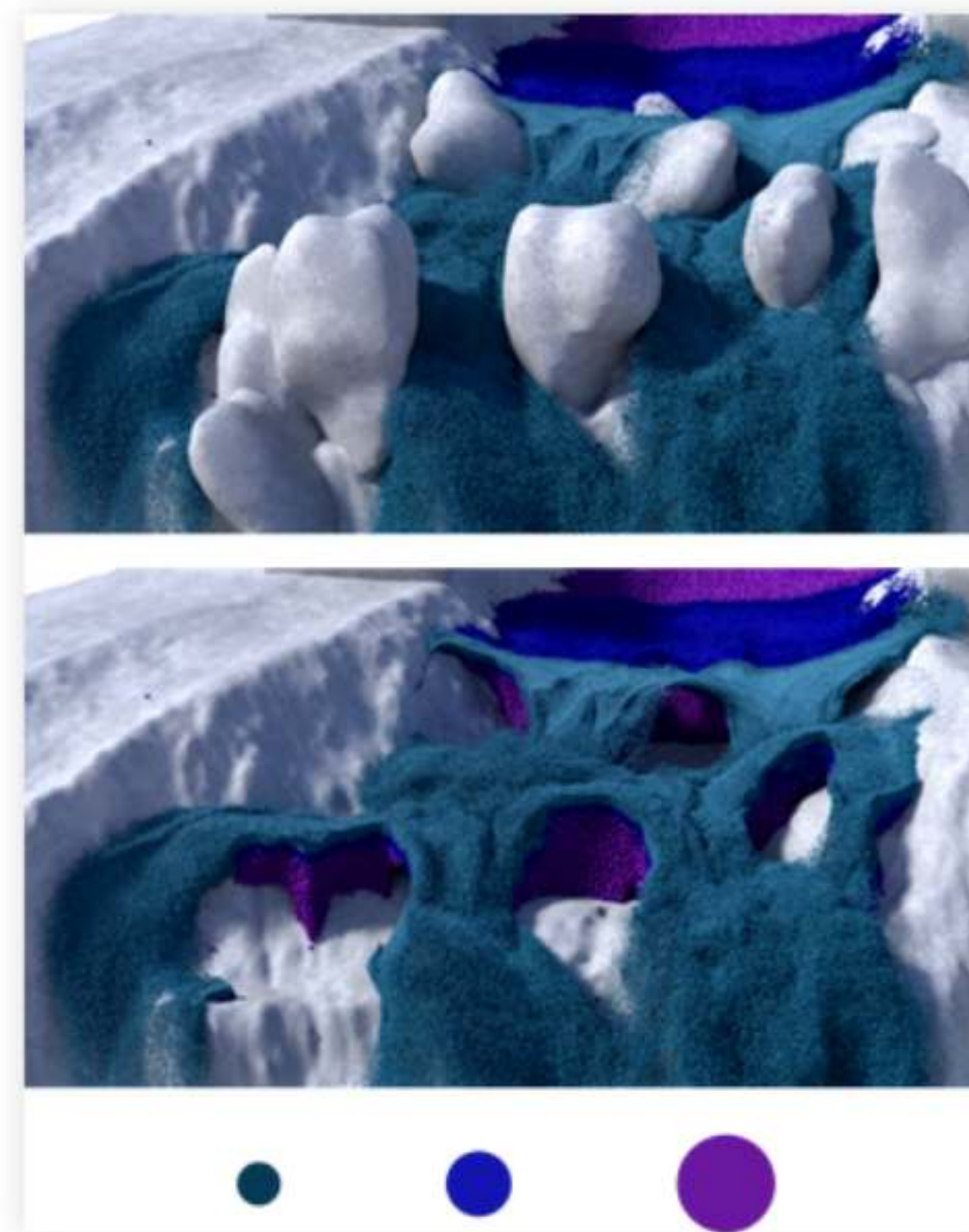
2.7x plus rapide

État de l'art : Modèles adaptatifs

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

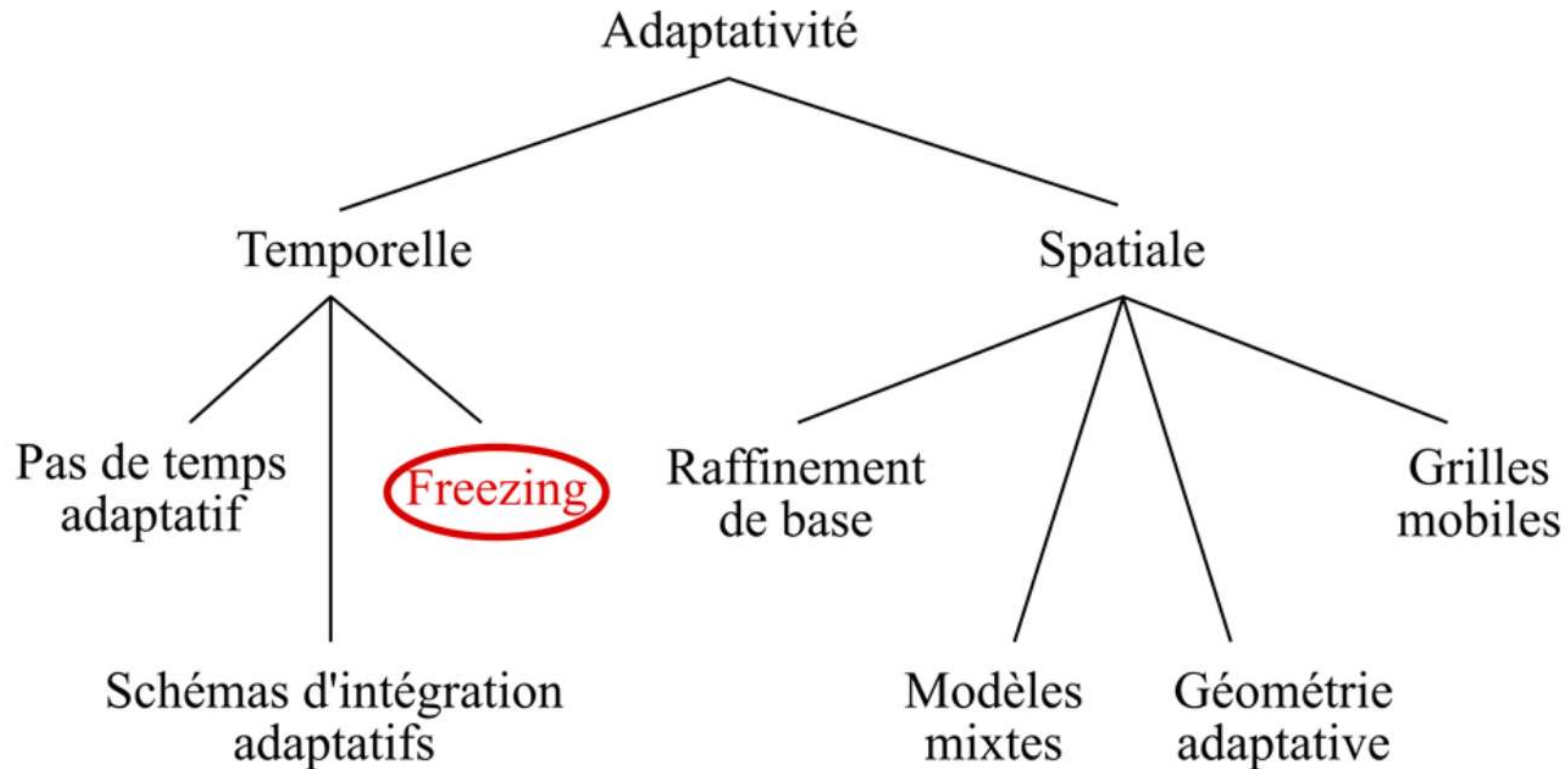


[Narain et al. 2012] Déformation



[Horvath et al. 2013] Distance surface / caméra

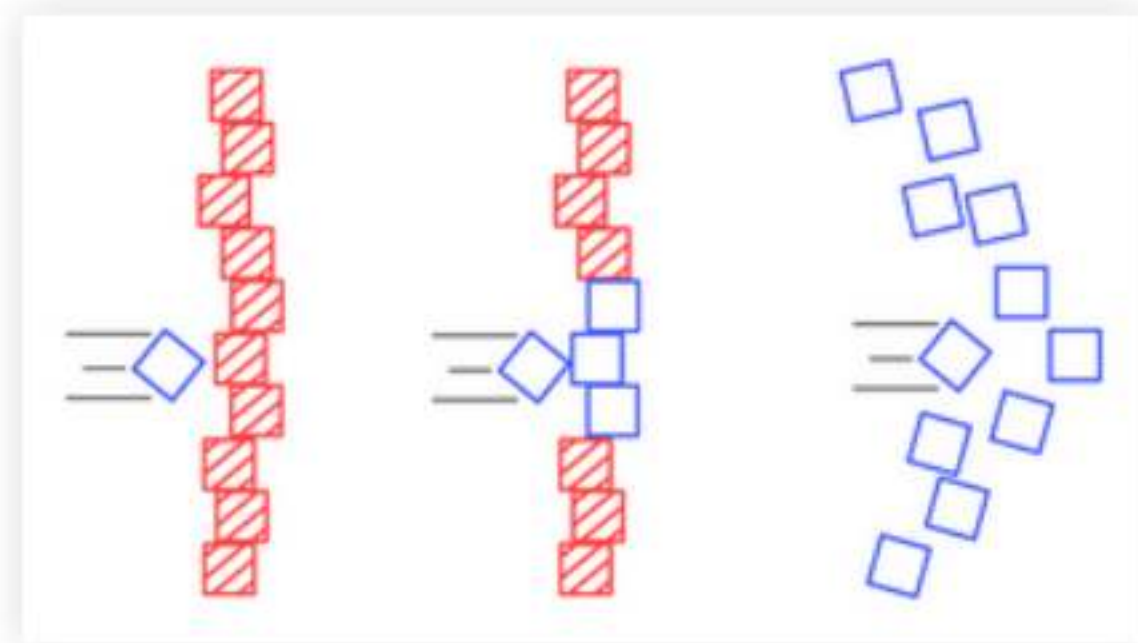
État de l'art : Modèles adaptatifs



État de l'art: Freezing

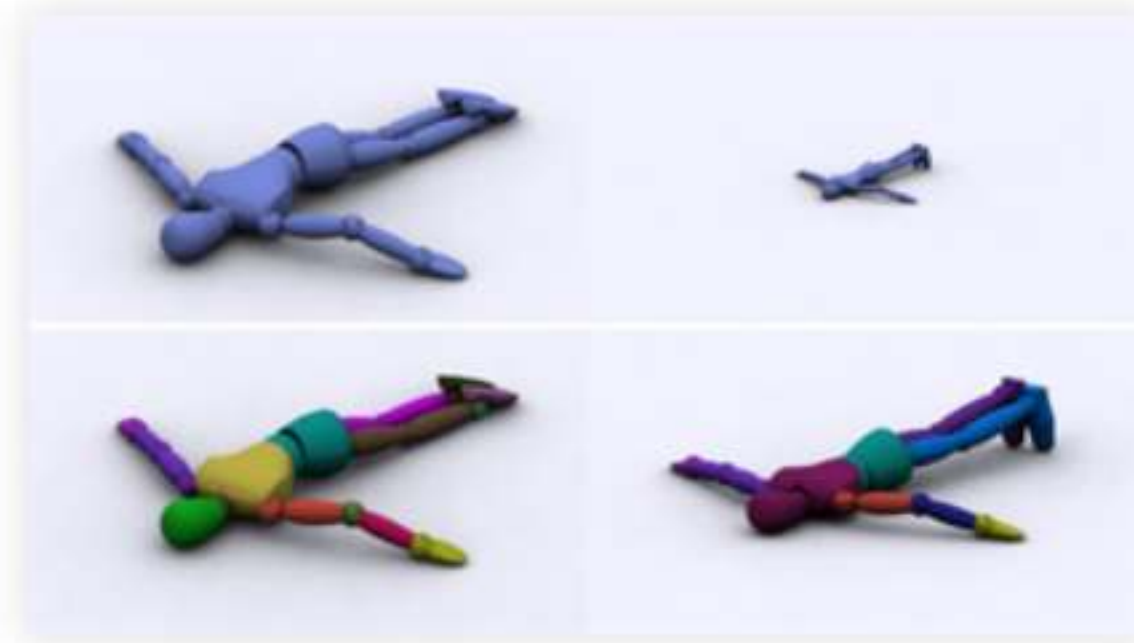
Gagner du temps dans les situations quasi-statiques

Objets Rigides



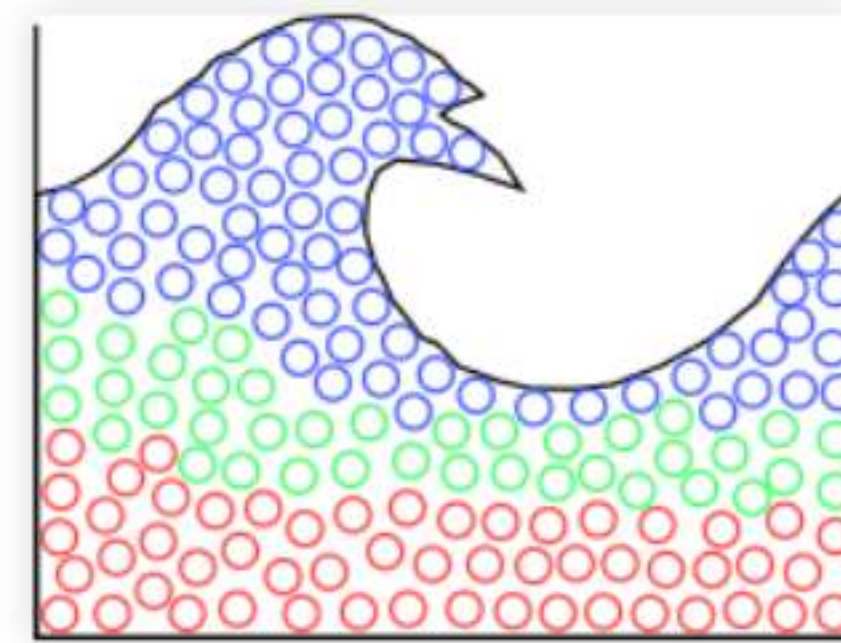
[Schmidl et al. 2002]
[Guendelman et al. 2003]

Rigides Articulés



[Kim et al. 2008]

Liquides



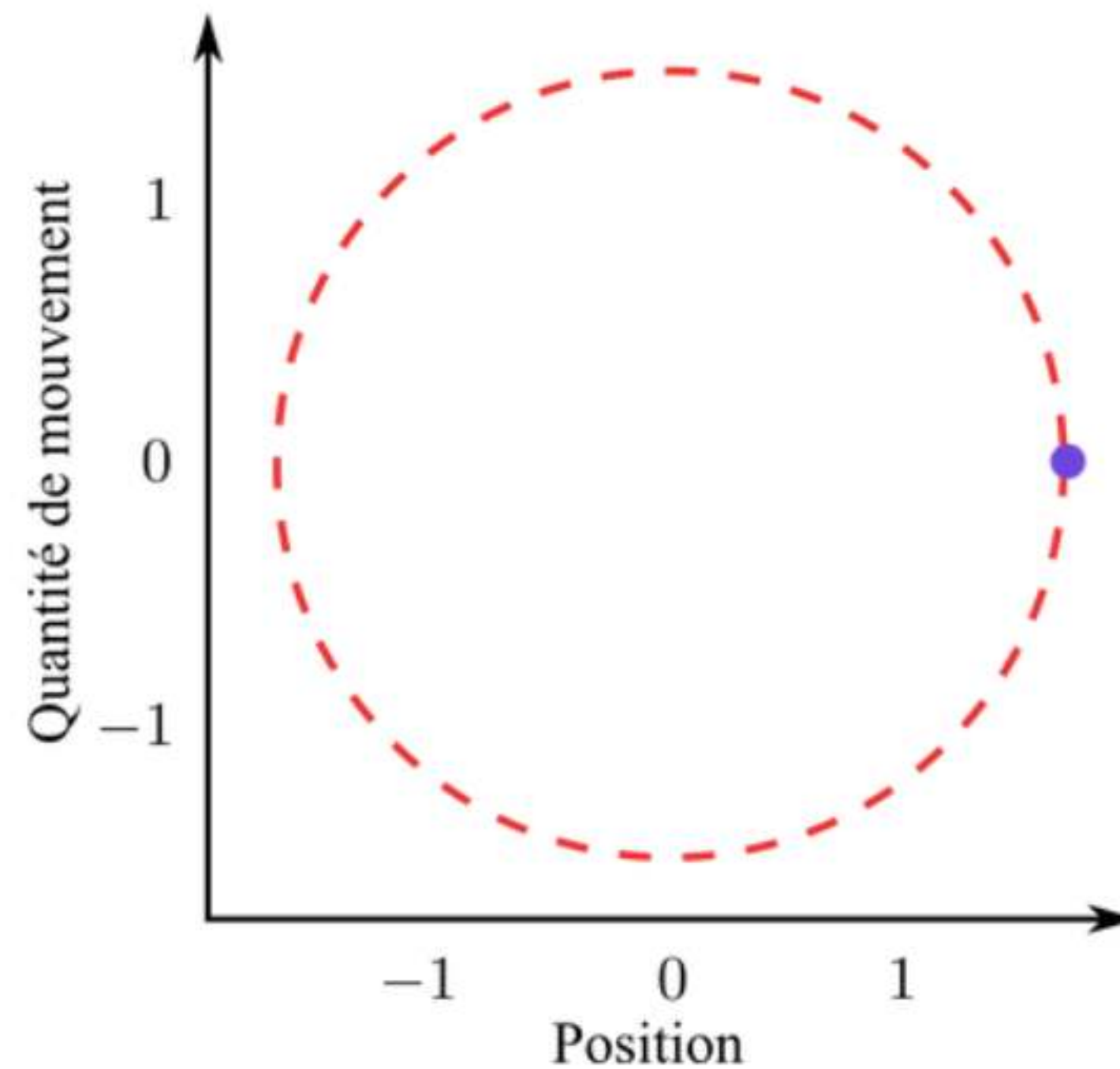
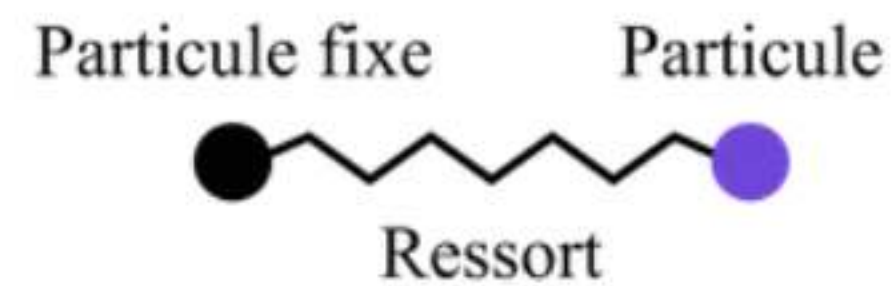
[Goswami et al. 2011]

Nombre constant de degrés de liberté

Défi : Réactiver de manière cohérente une simulation

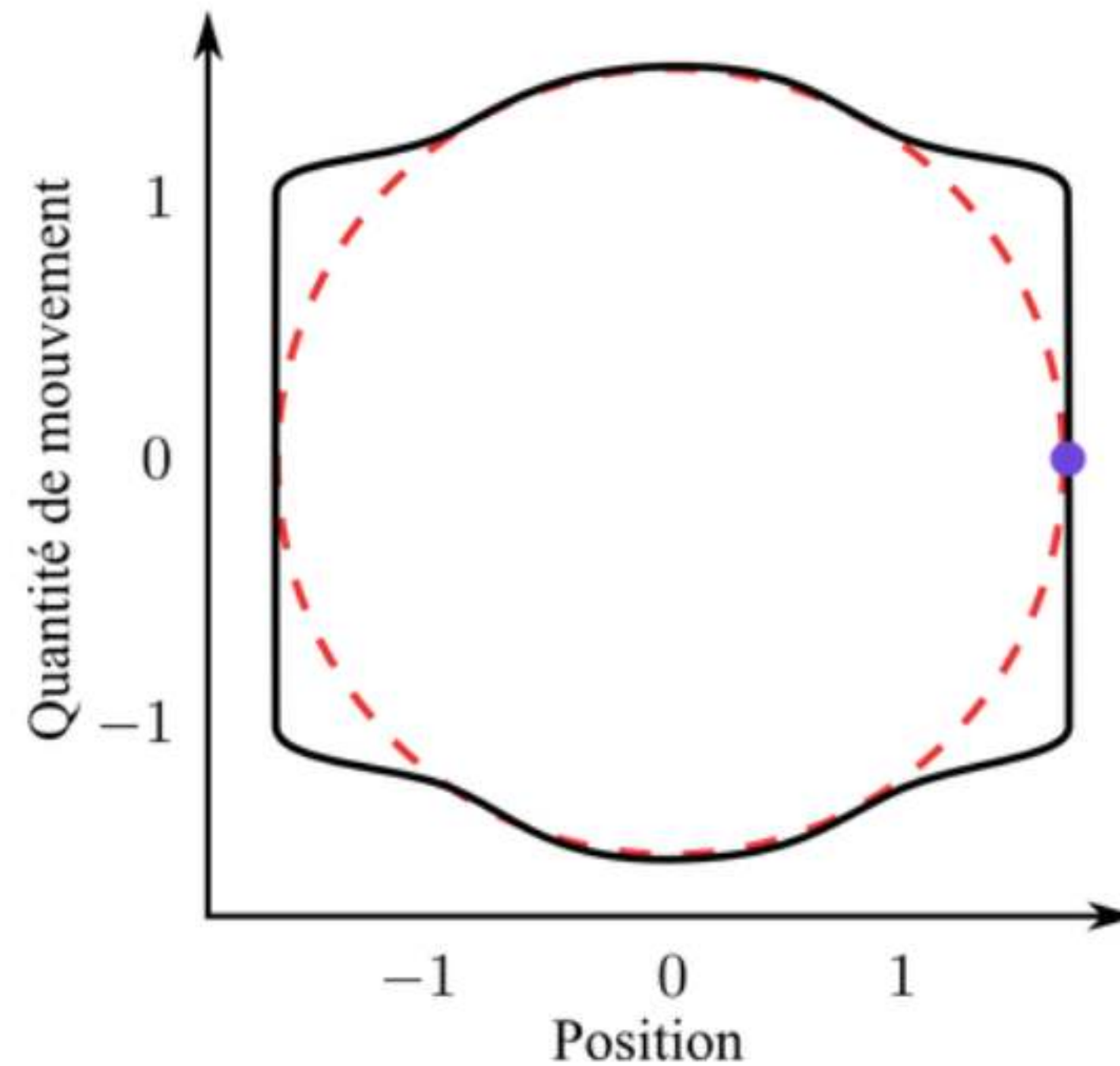
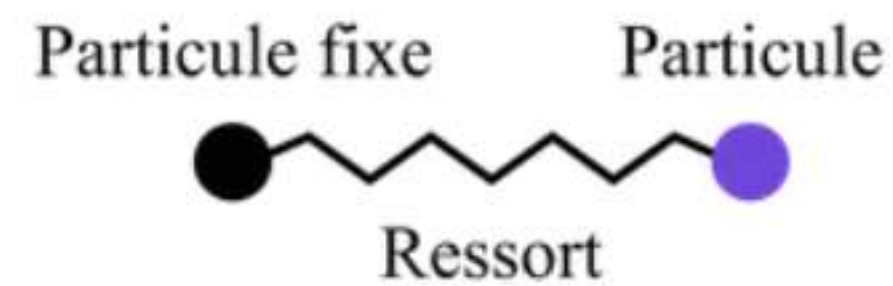
Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

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



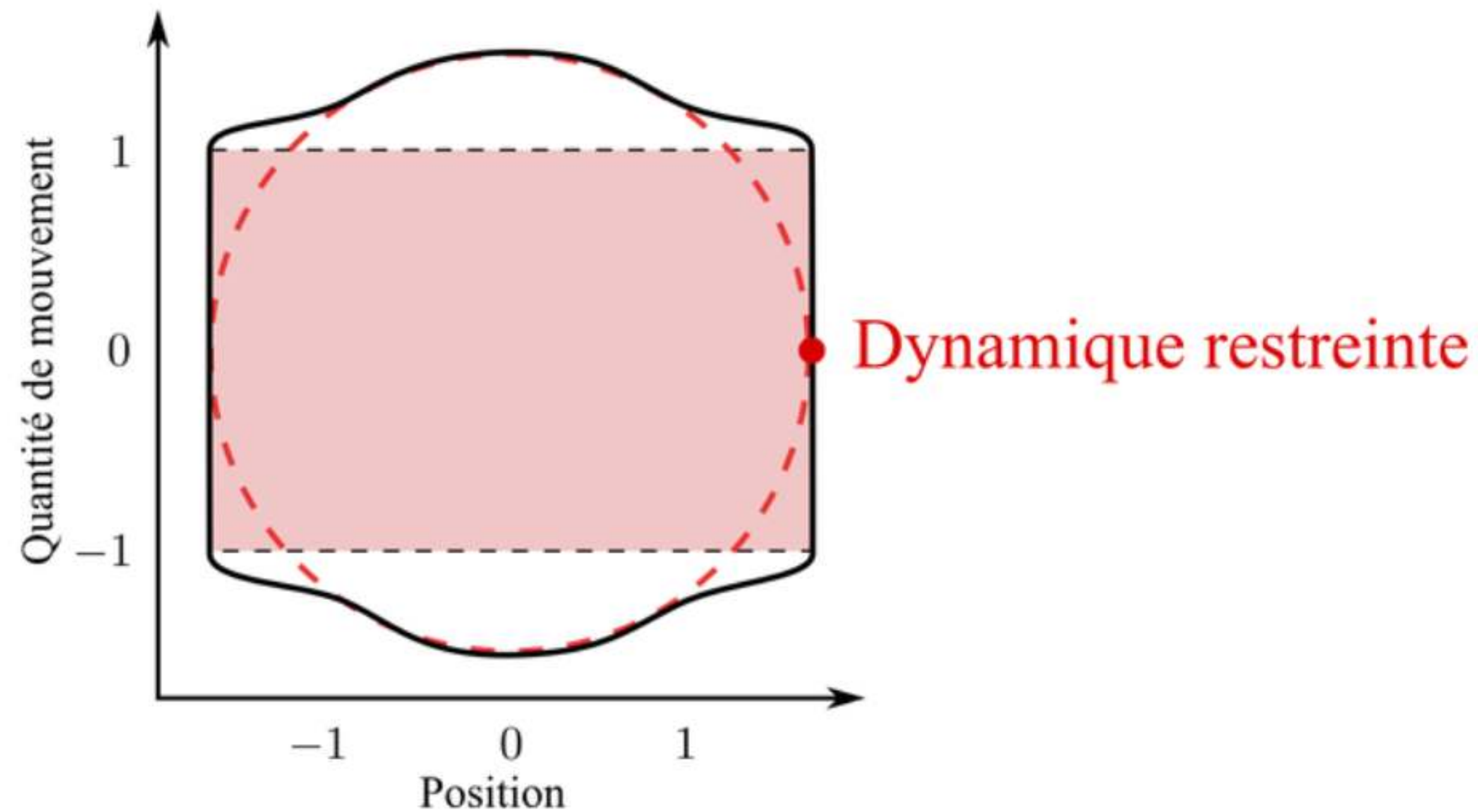
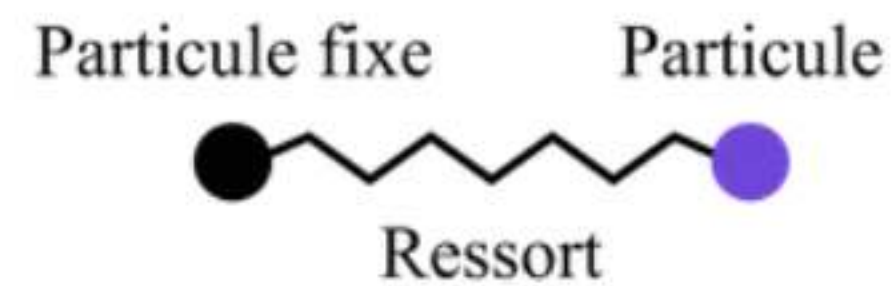
Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

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



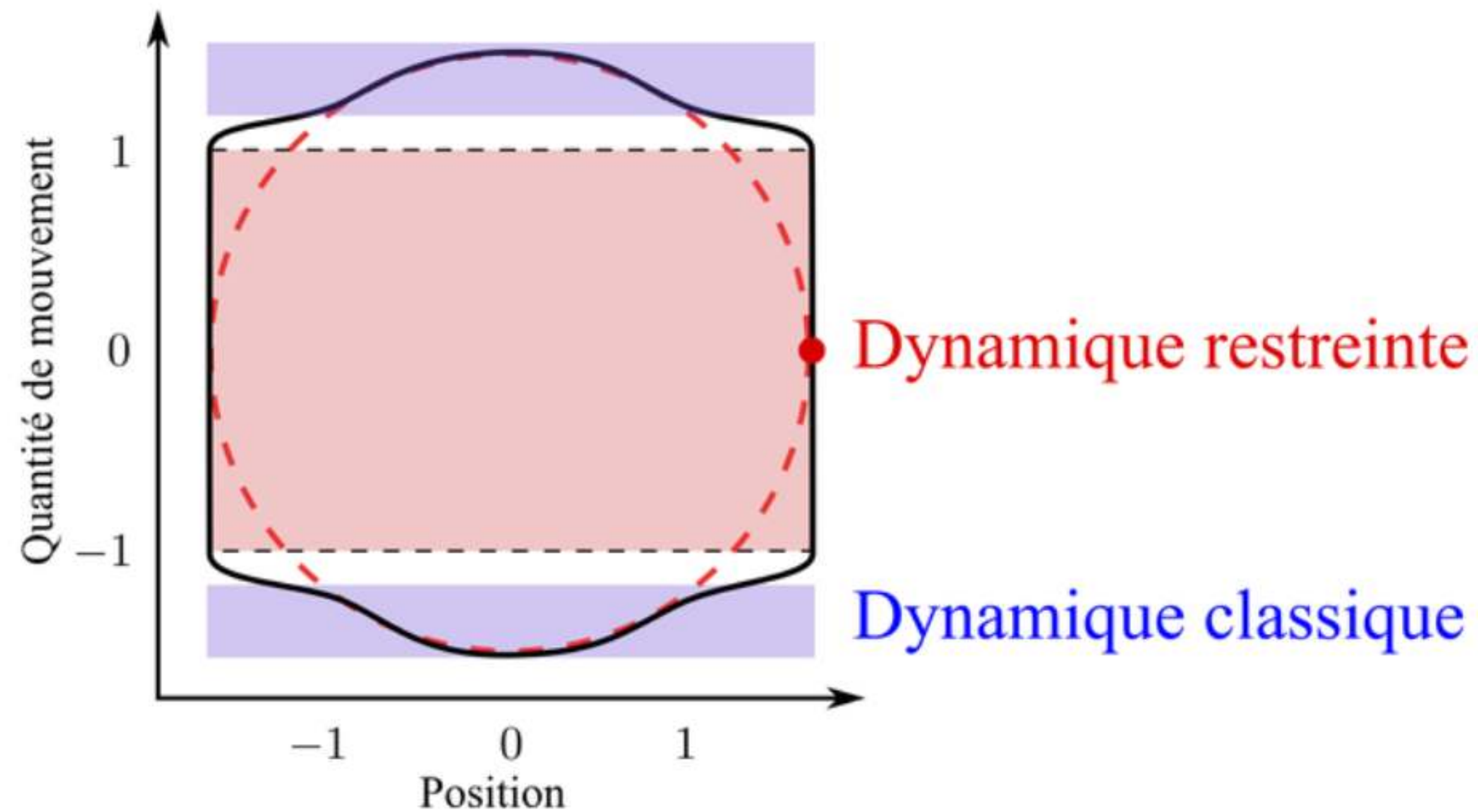
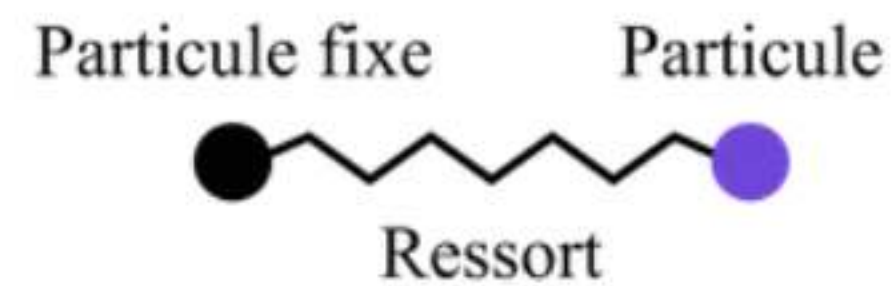
Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

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



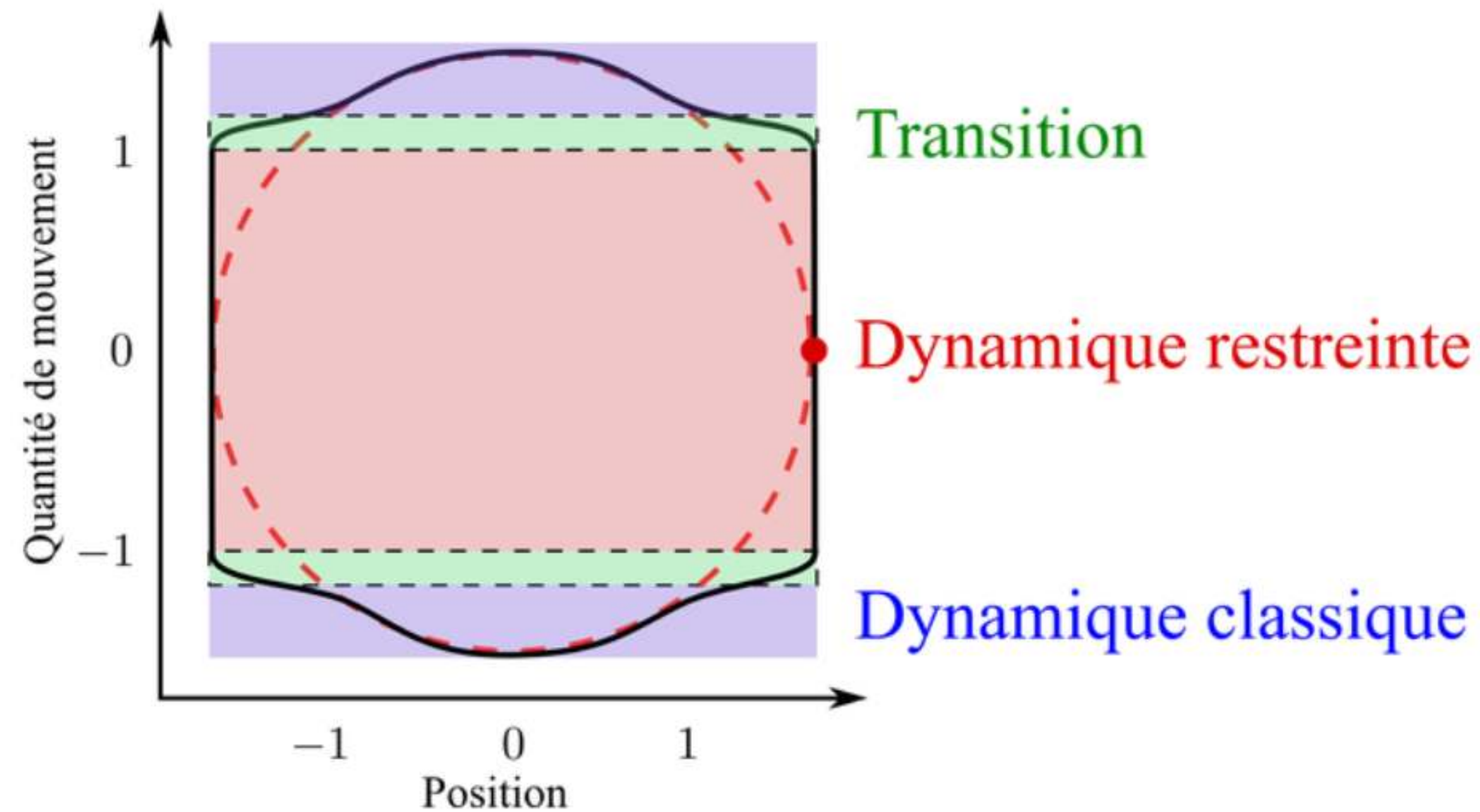
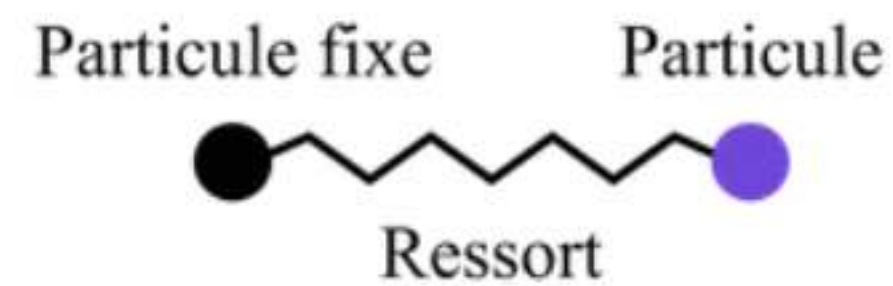
Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

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



Adaptively Restrained Particle Simulations (ARPS)

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

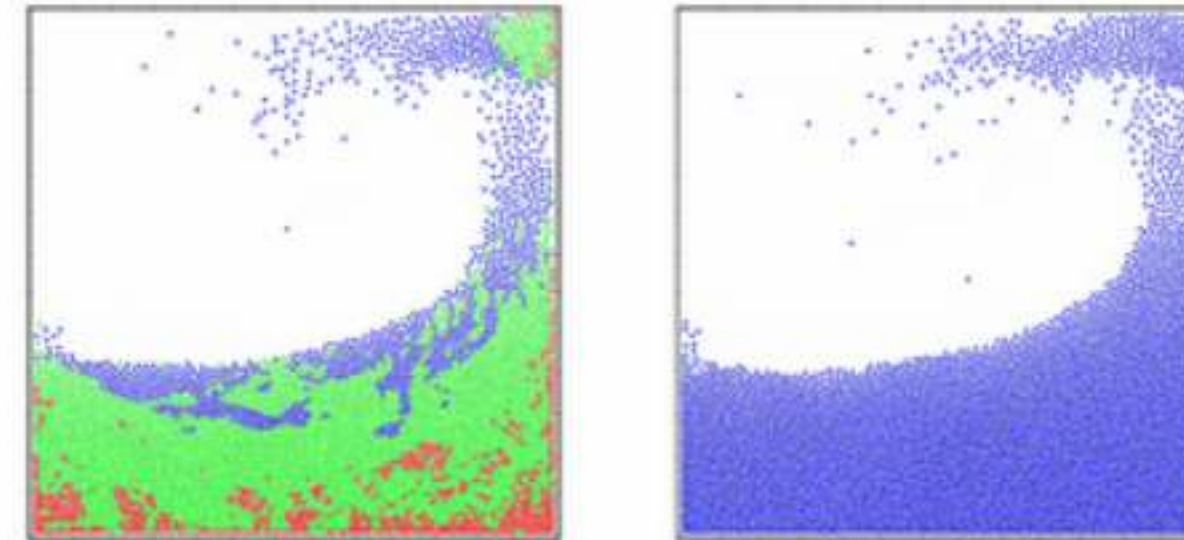


Contributions

Extension de ARPS aux simulations graphiques

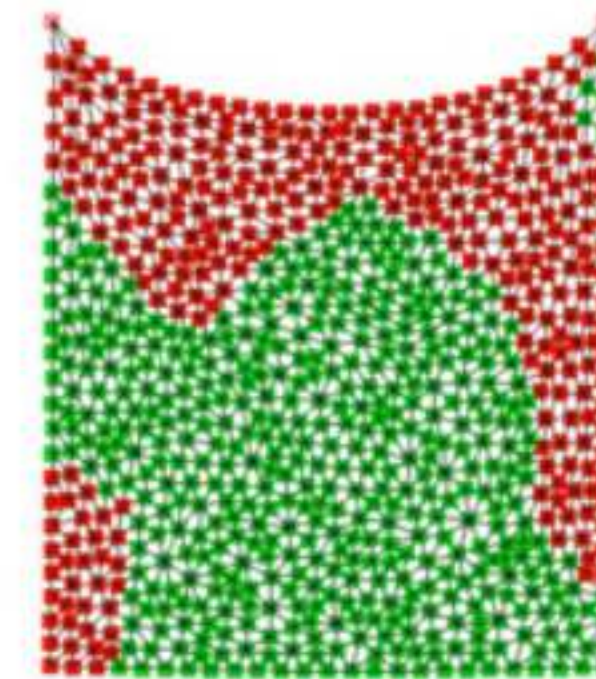
Simulation de liquide

ARPS + SPH



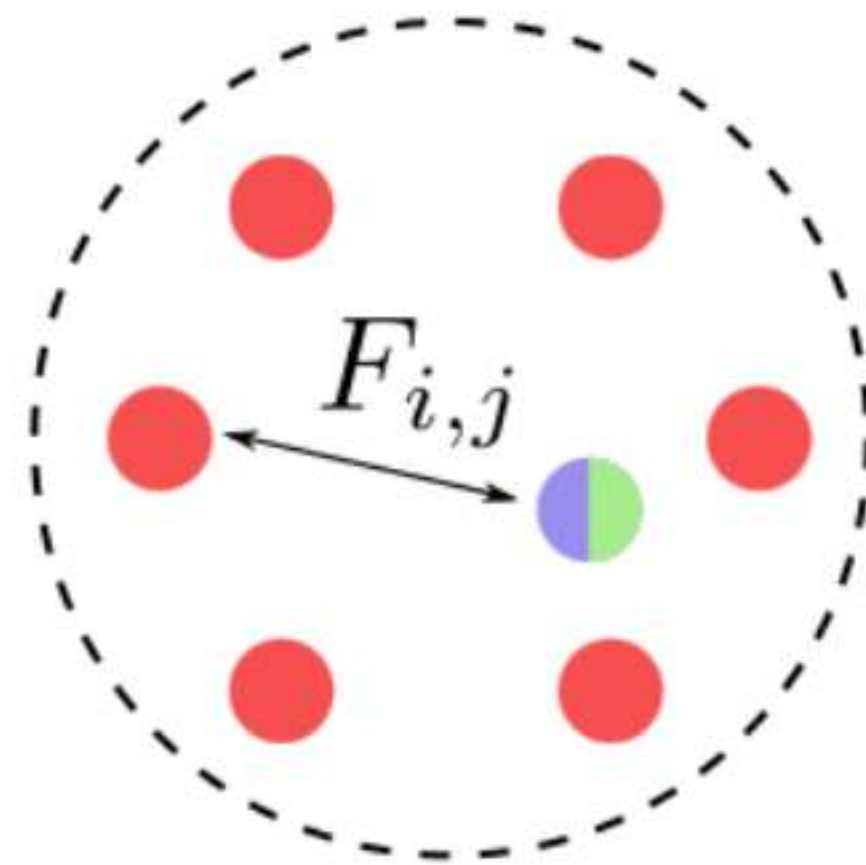
Simulation de vêtements

Intégrateur implicite



Extension aux liquides particulaires

Combinaison simple avec l'ARPS



● Inactive
● Active/Transitive

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

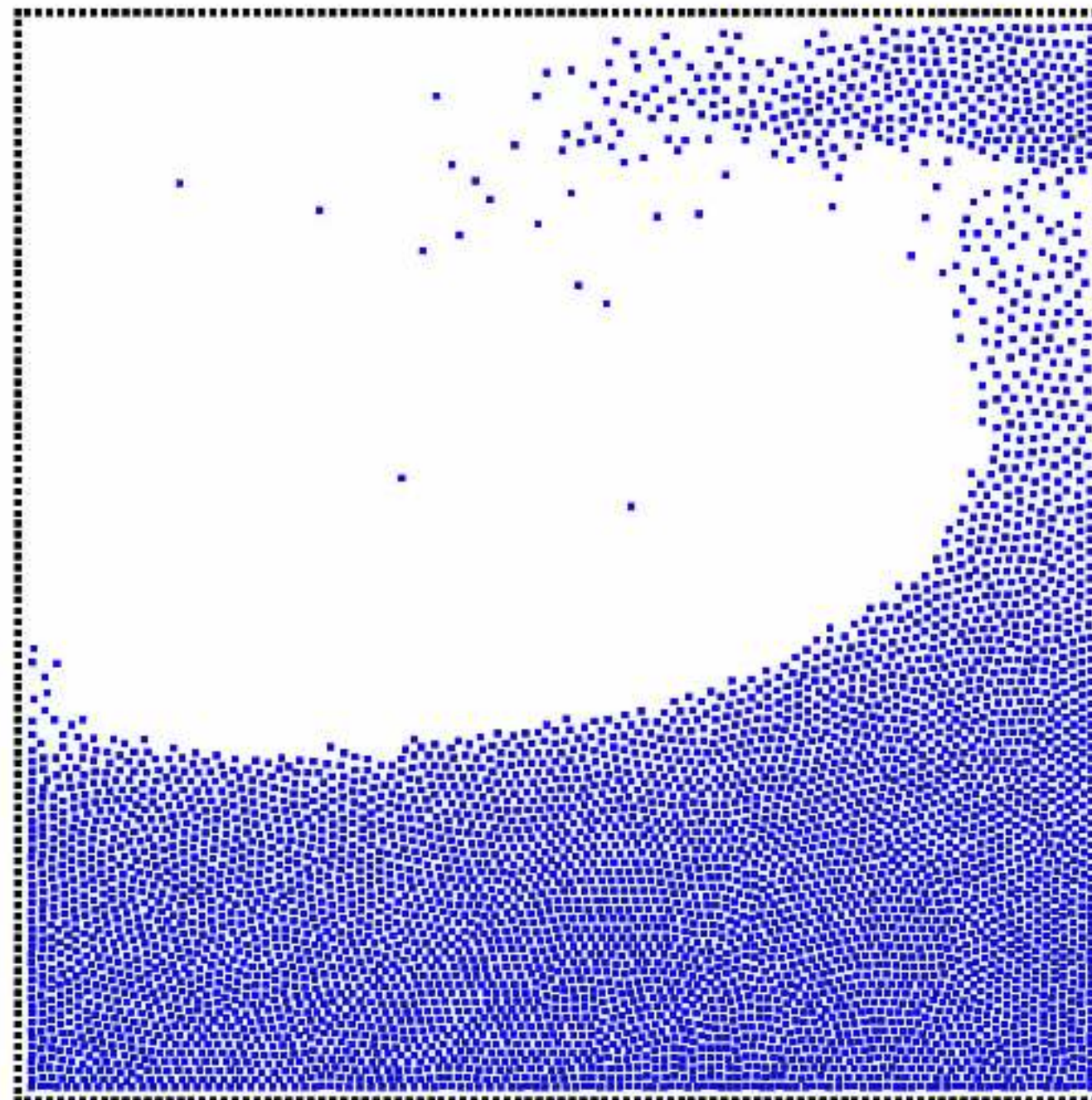
Calcul restreint aux particules actives/transitives

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

Mise à jour des particules inactives par symétrie

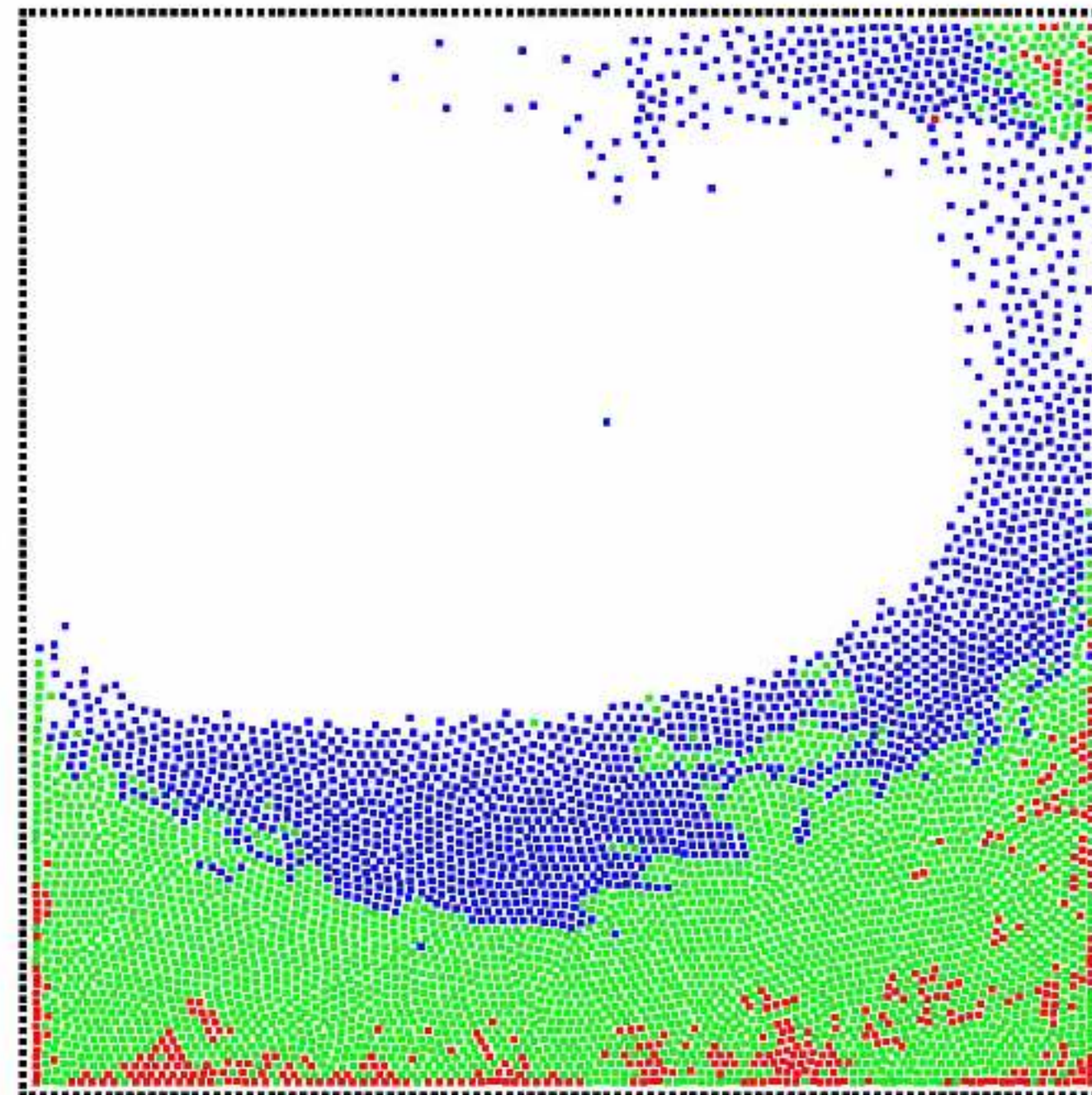
Extension aux liquides particulaires

Dam Break - 5000 particules



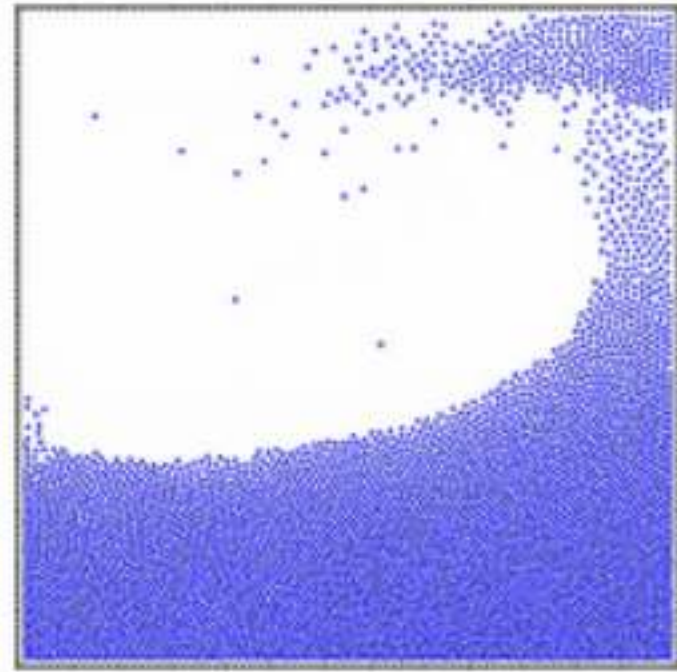
Extension aux liquides particulaires

Dam Break - 5000 particules

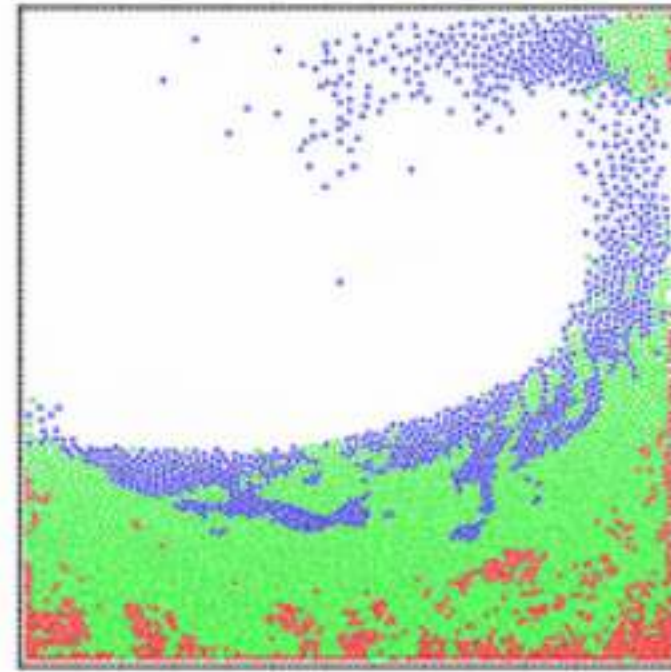


Extension aux liquides particulaires

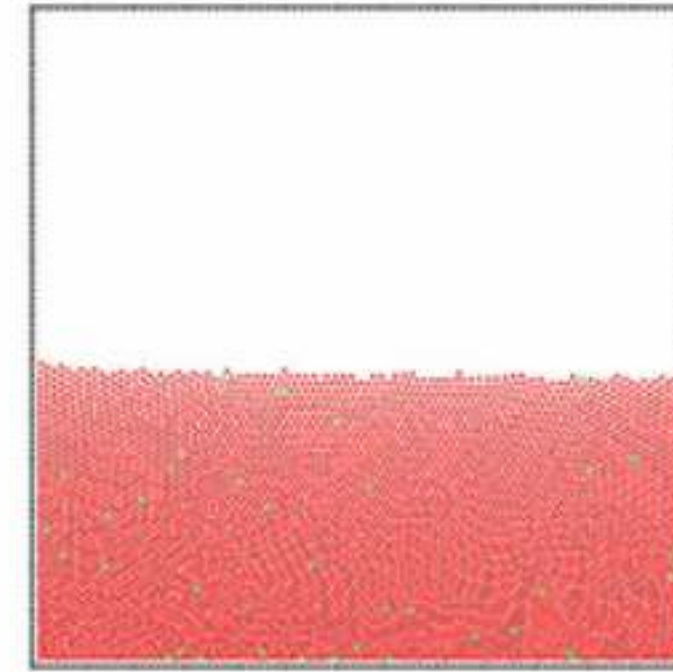
Dam Break - 5000 particules



SPH



SPH + ARPS



- Accélération : 3.85x
- Caractéristiques préservées

Extension à la simulation de vêtement



[Baraff&Witkin 1998]

Explicite

- Stabilité

- Petit Δt

Implicite

+ Stabilité

+ Grand Δt

- Coût

m masse
 \mathbf{p} quantité de mouvement
 \mathbf{f} force
 M Matrice de masse
 K Matrice de raideur

Résolution d'un système linéaire

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

Extension à la simulation de vêtement

Intégration implicite de l'ARPS

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

\mathbf{R} matrice diagonale par bloc
 \mathbf{s} vecteur

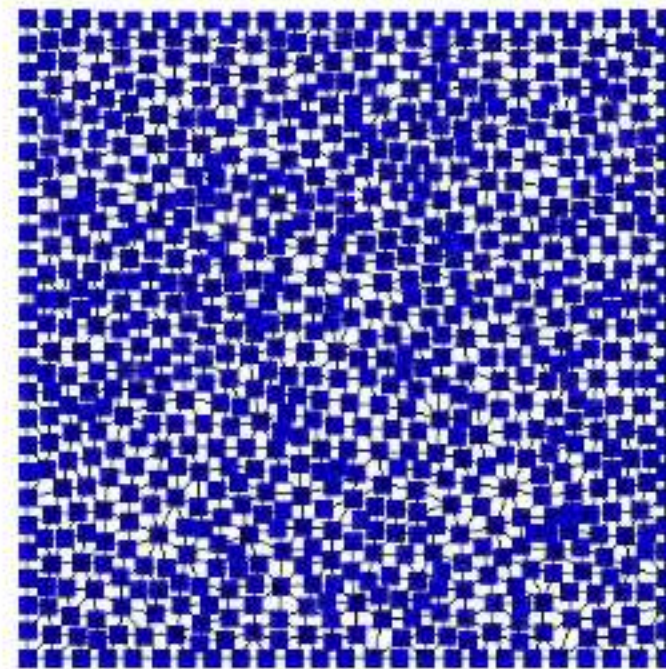
} Encapsule la transition et l'état des particules

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

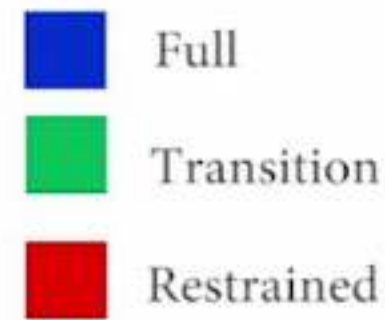
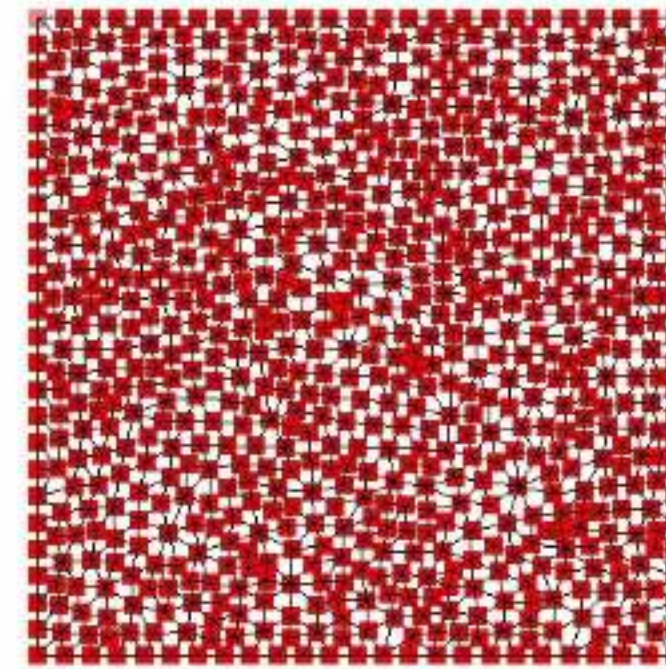
Réduire la taille du système linéaire aux particules actives/transitives

Extension à la simulation de vêtement

Implicit Solver



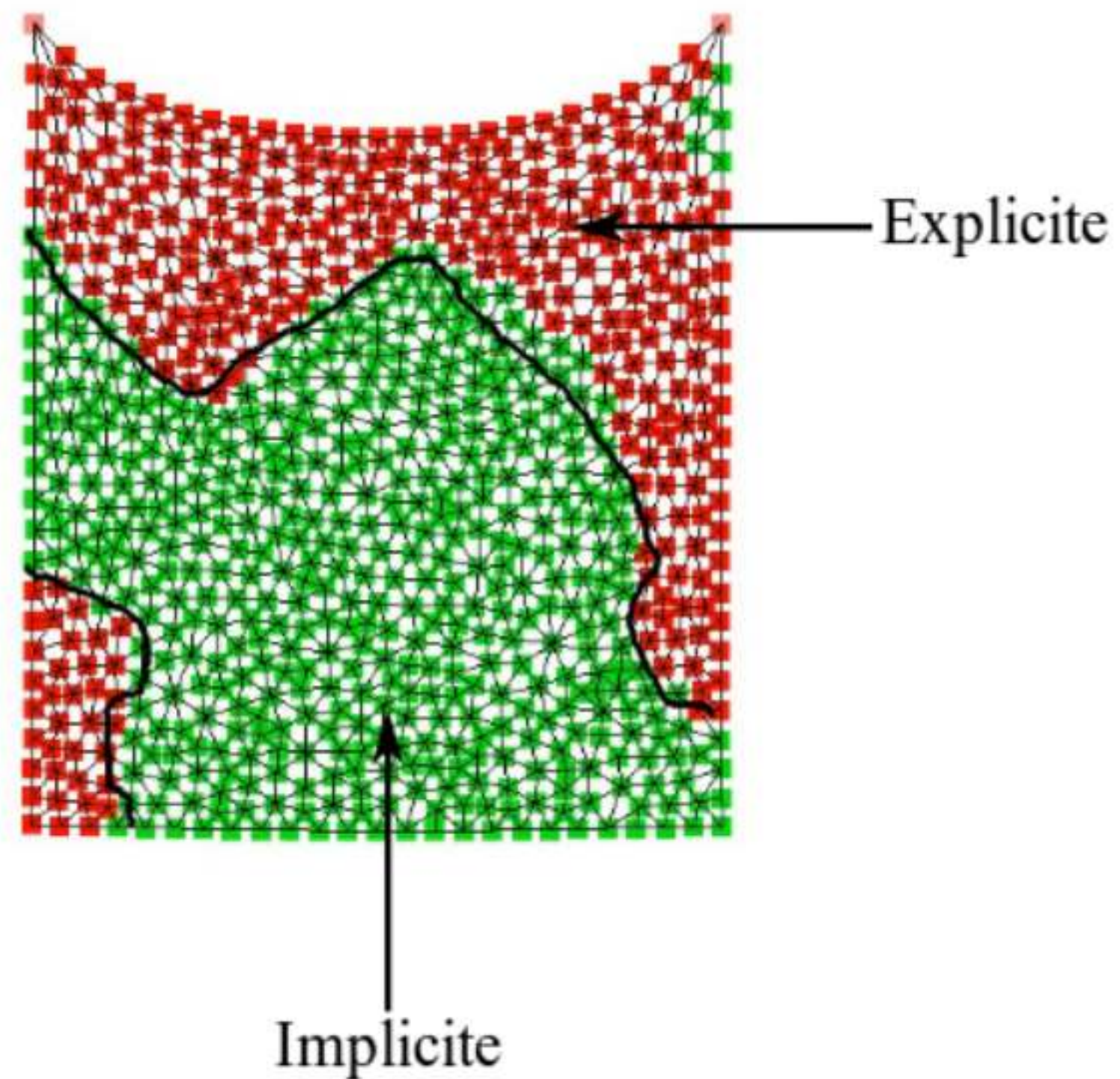
ARPS Hybrid Solver



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

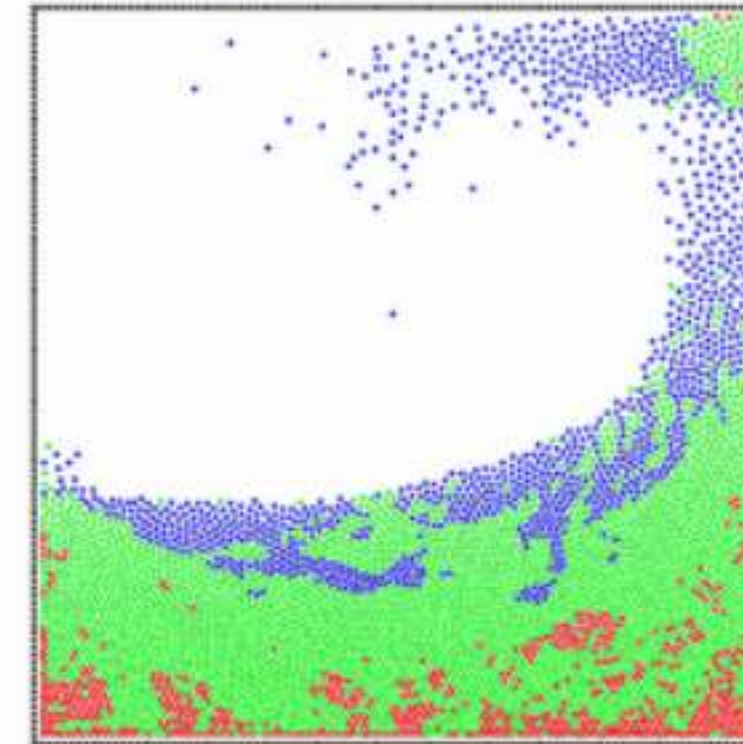
Contributions

Liquide : Algorithme SPH+ARPS

Vêtements : Intégrateur implicite

+ Accélération importante

+ Coût mémoire constant



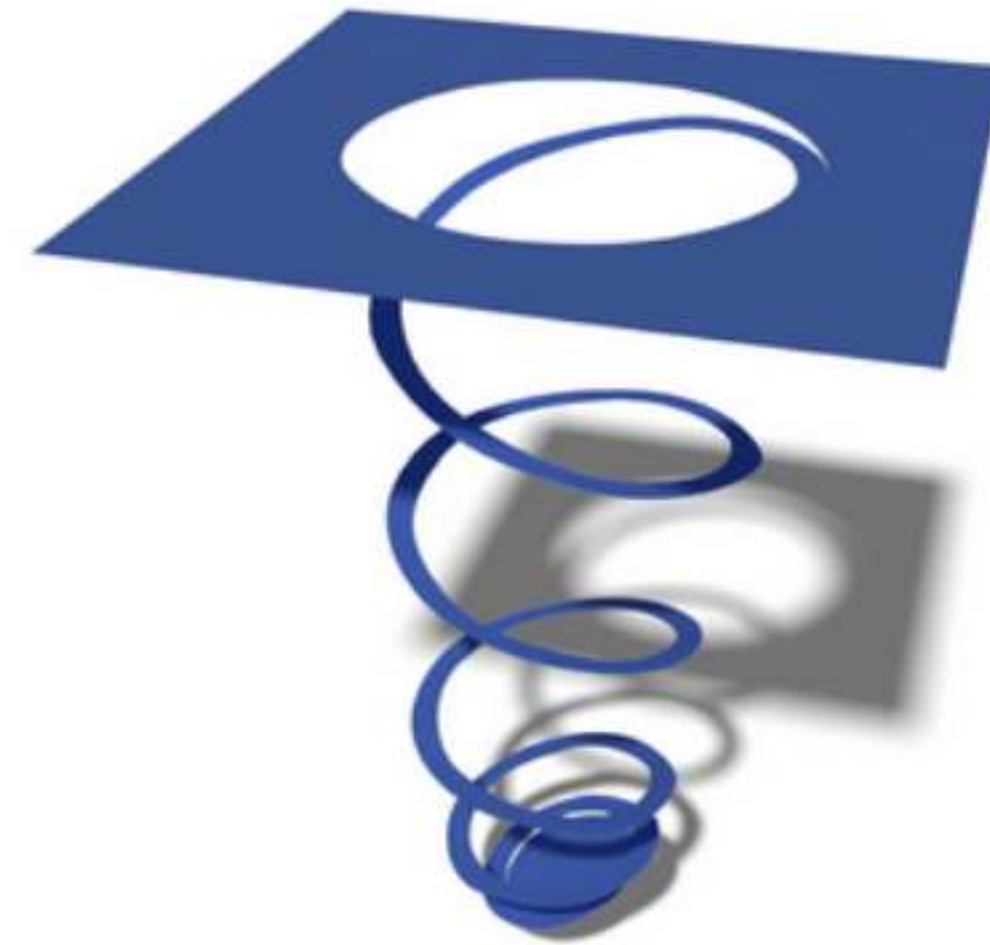
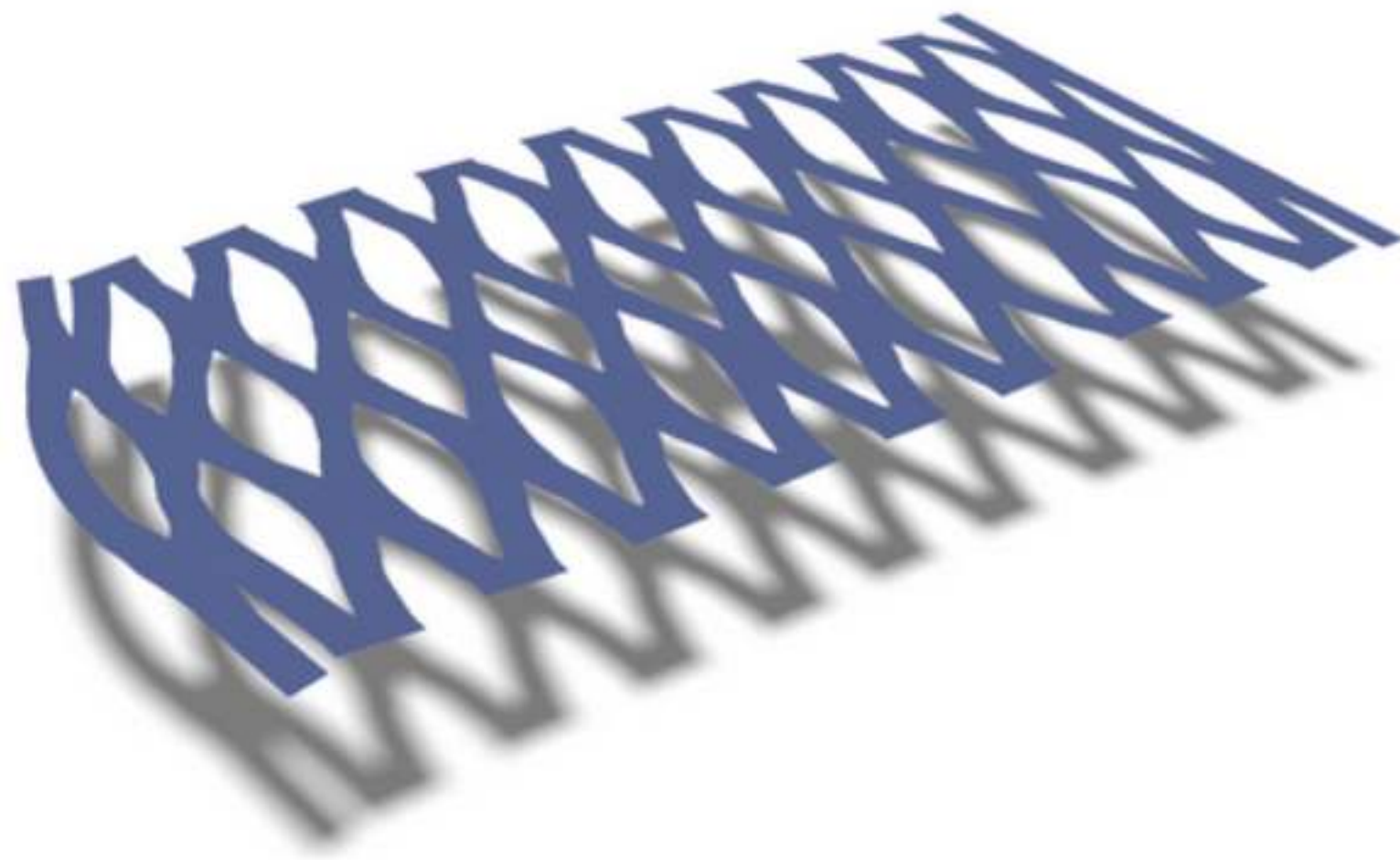
Limitations & perspectives

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

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

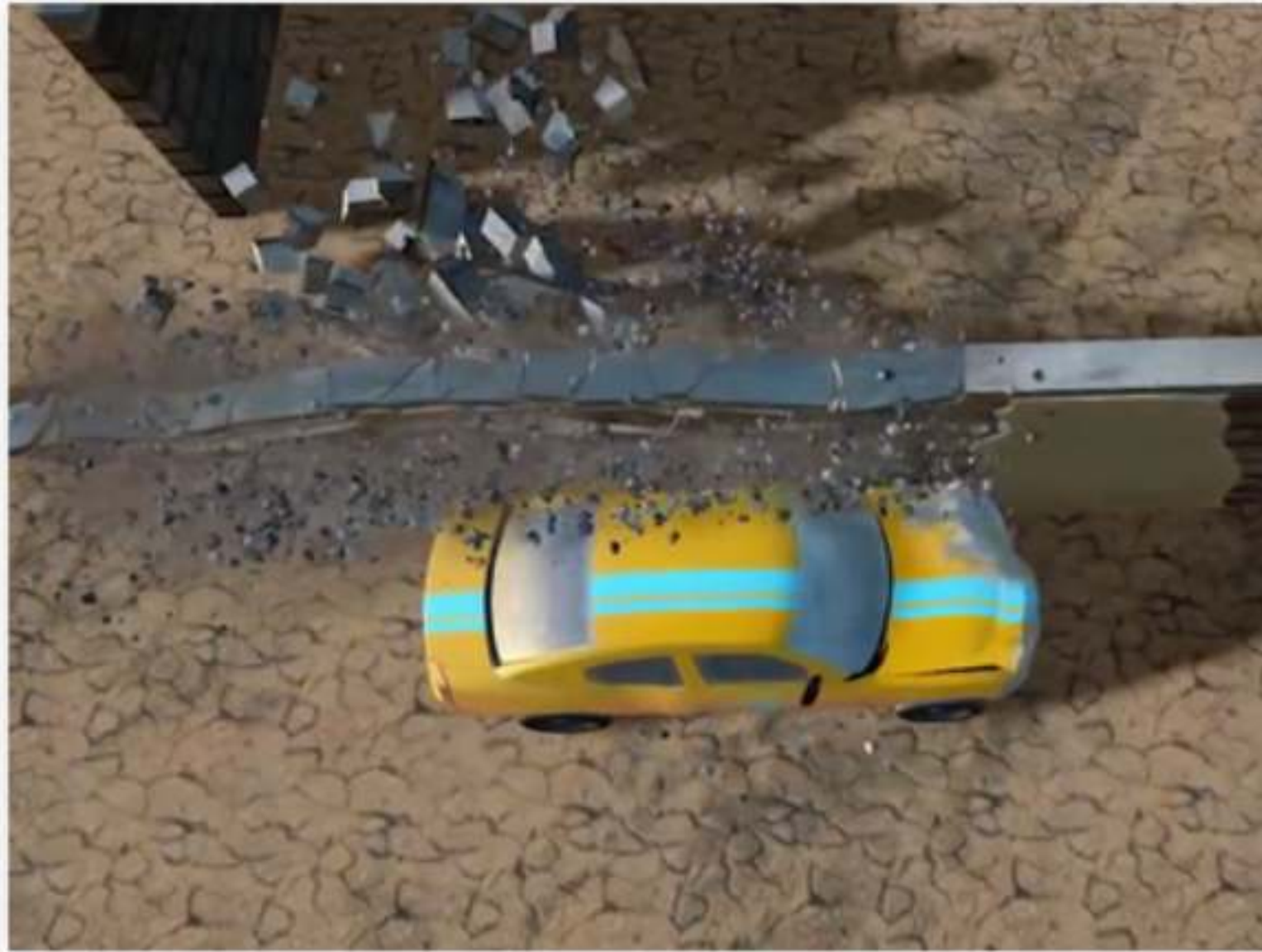
[Manteaux, Wojtan, Narain, Redon, Faure, Cani, CGF'16]

Découpe détaillée et interactive d'objets fins



Motivations

Changements topologiques = Immersion



Havok



Unreal Engine 4

Détails = f (degrés de liberté)

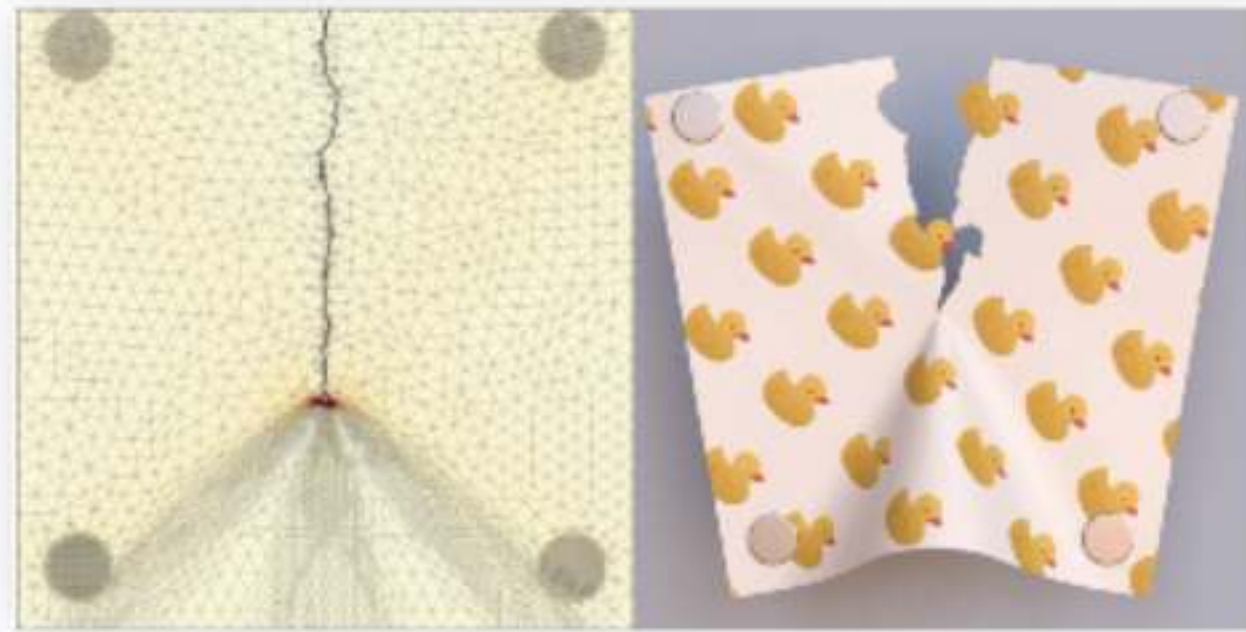
Notre approche

~~Détails = f (degrés de liberté)~~

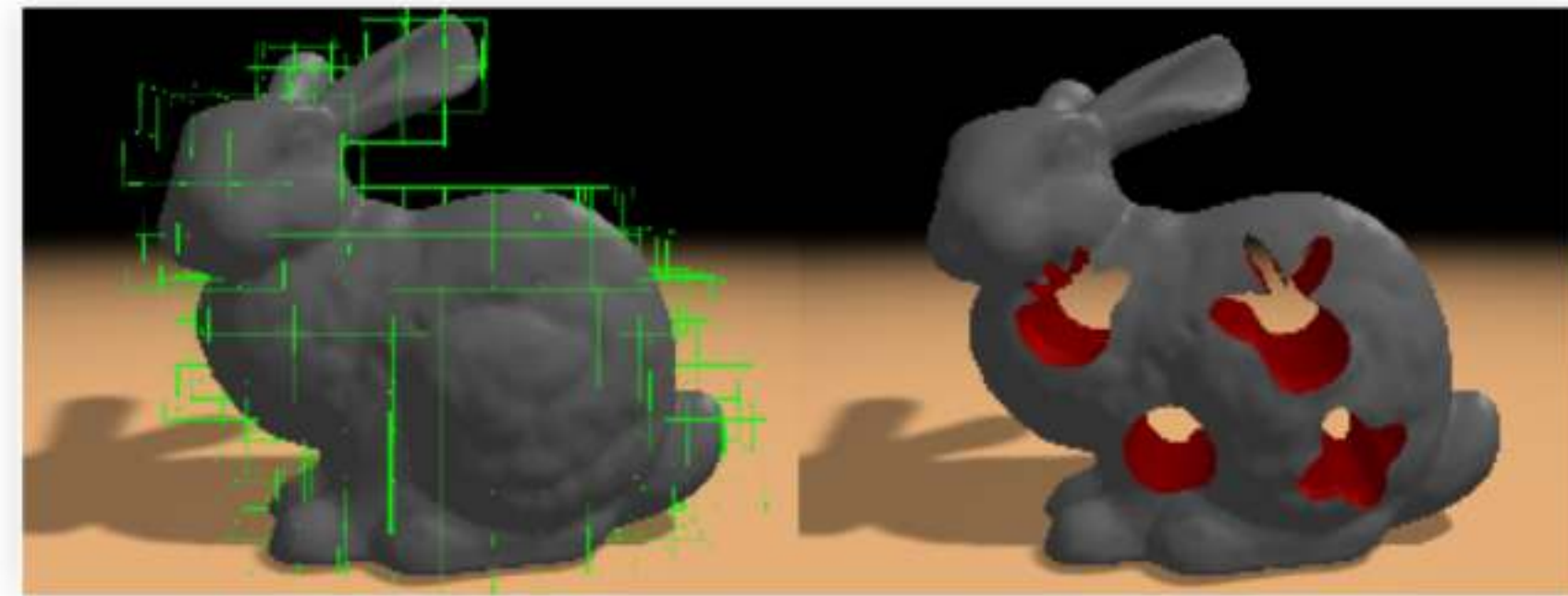


État de l'art

Changements topologiques



[Pfaff et al. 2014], 3010 DDL

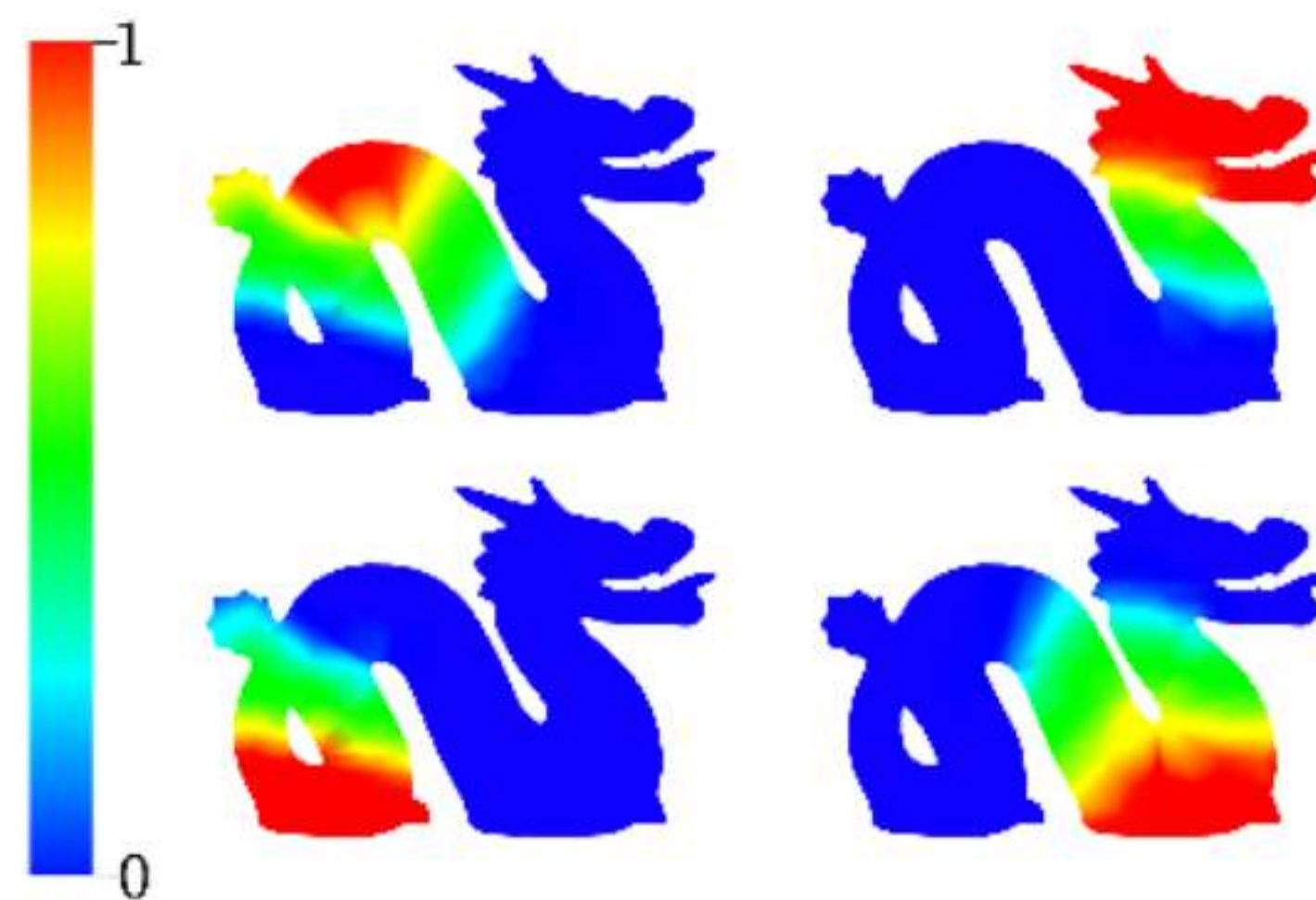
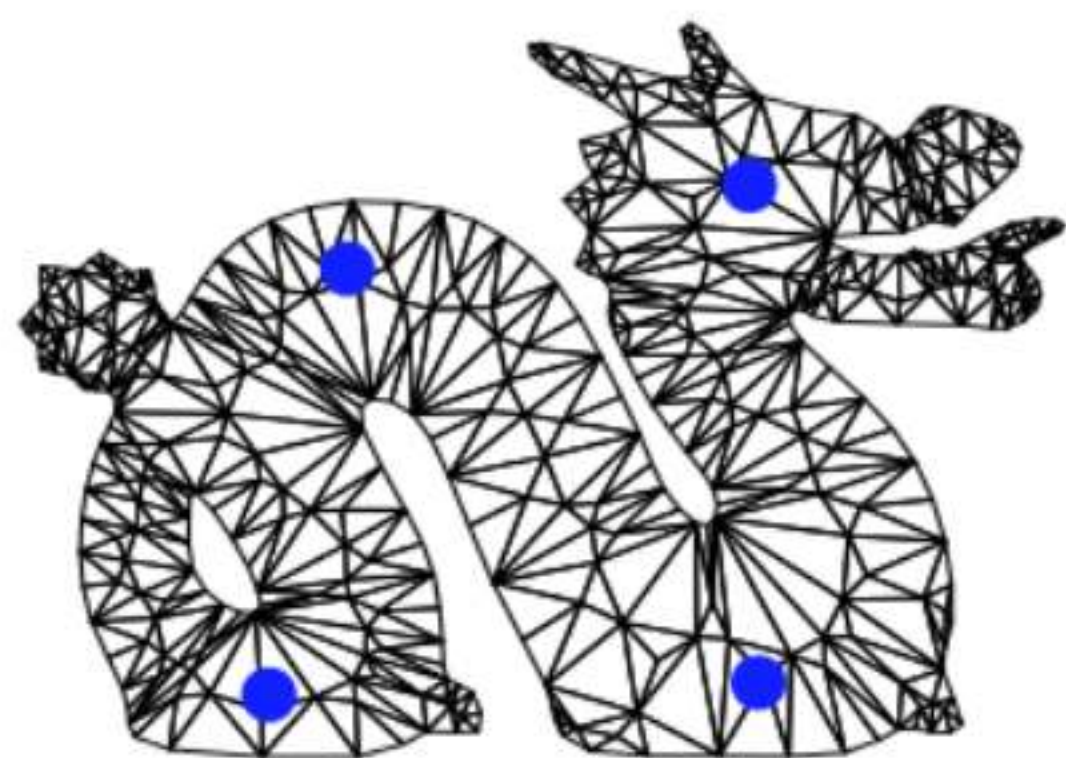


[Wu et al. 2011], 4485 DDL

Variation importante du nombre de DDL

Modèle déformable à base de repères

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

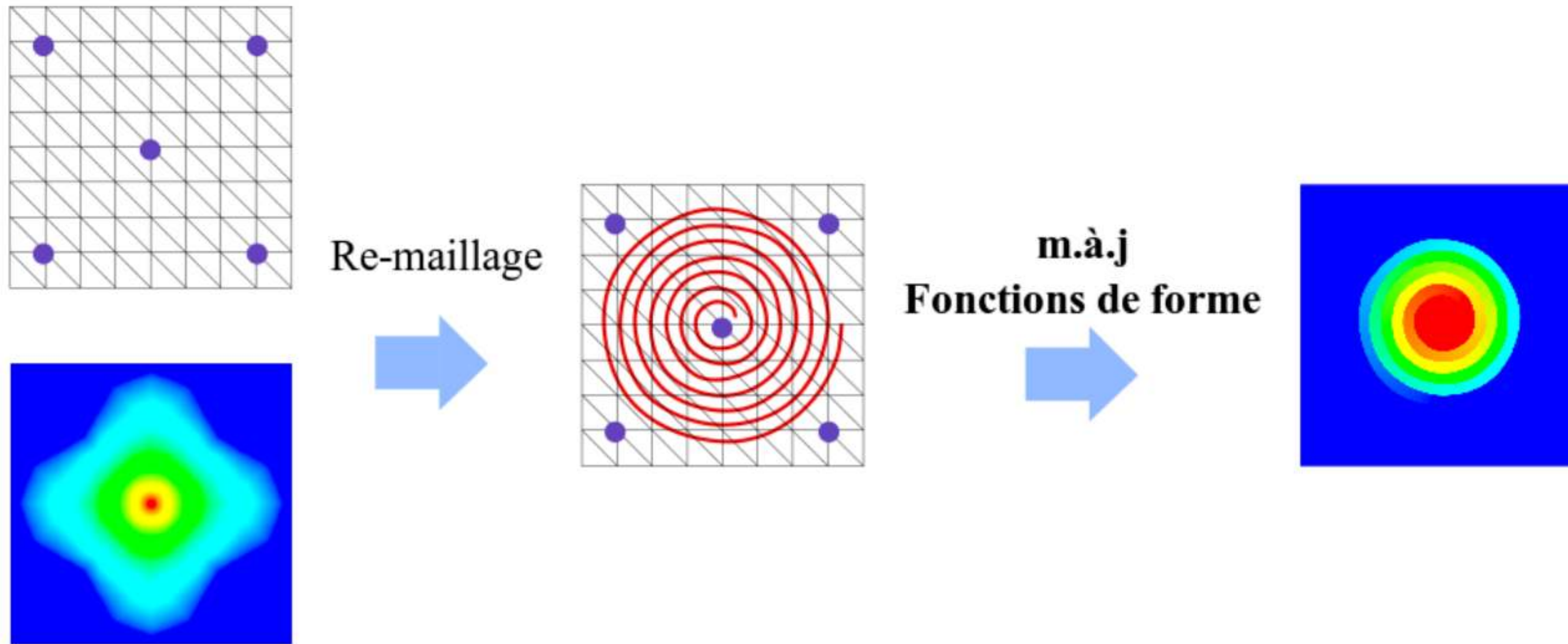


Fonctions de forme globales



Très peu de DDL

Processus de découpe



Processus de découpe

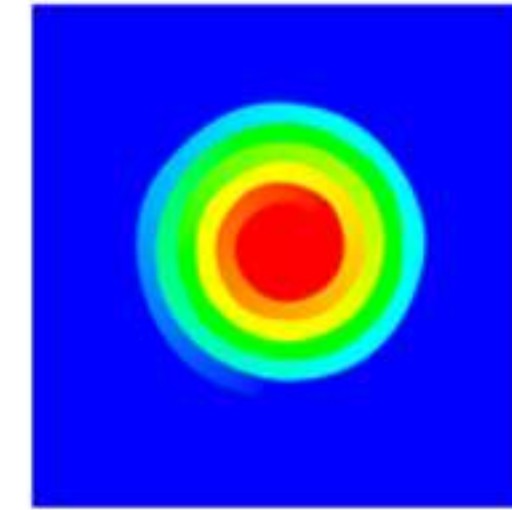
Shapefunctions are computed on a non-manifold grid.

At each cut, they adapt to the mesh topology.

Contributions

Découpe détaillée, très peu de DDL

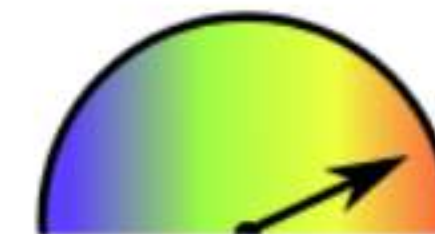
M.à.j fonctions de formes



Ré-échantillonnage des repères



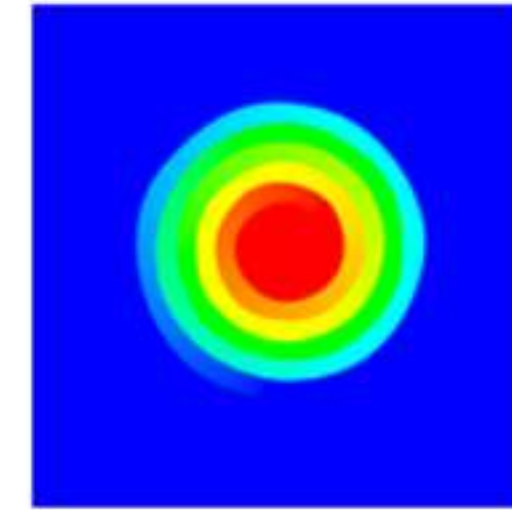
Mise à jour incrémentale



Contributions

Découpe détaillée, très peu de DDL

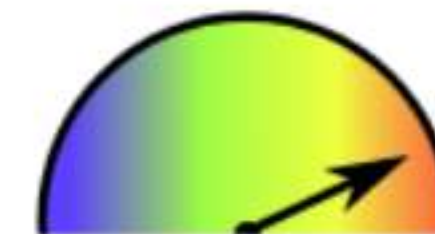
M.à.j fonctions de formes



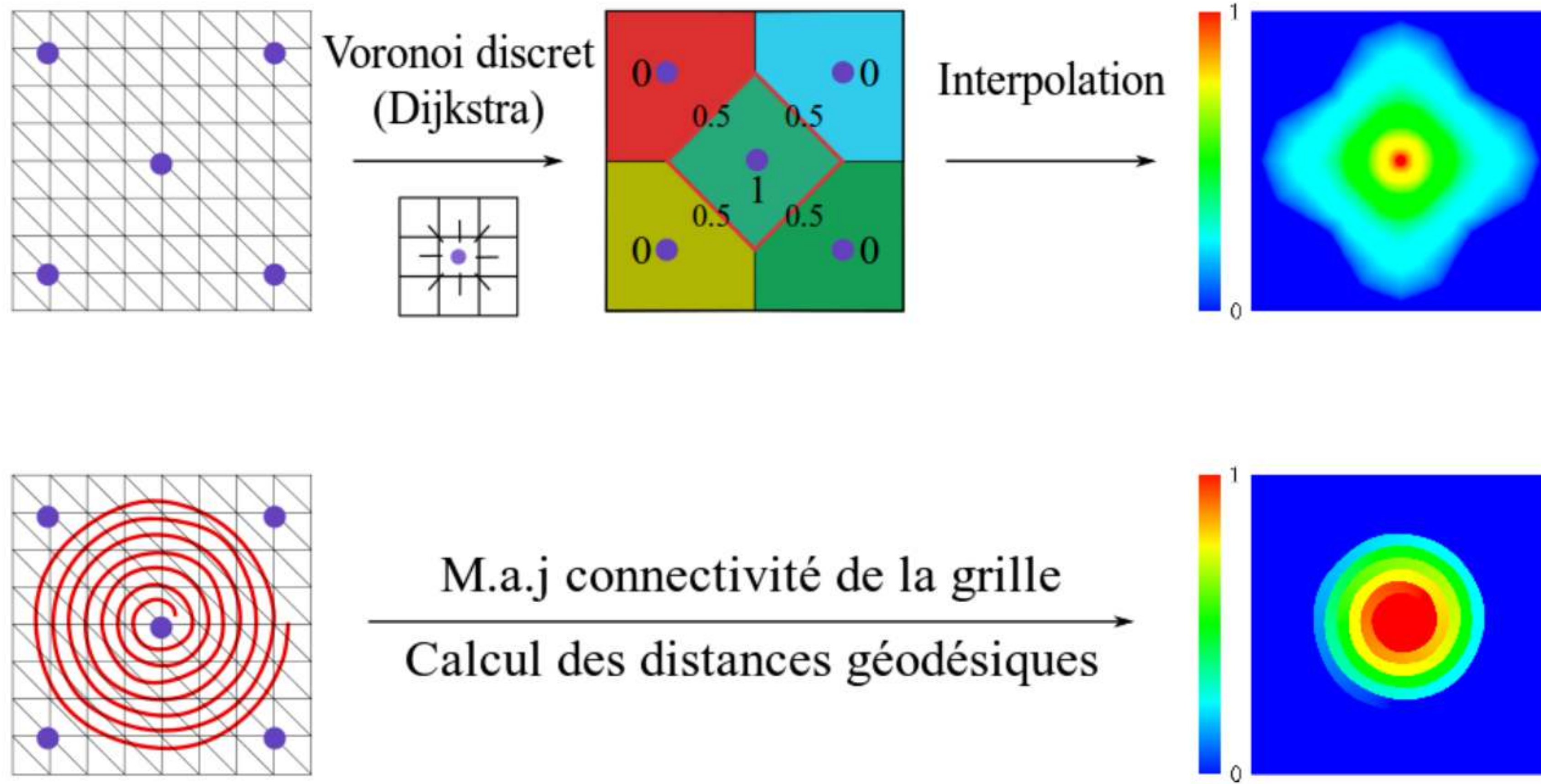
Ré-échantillonnage des repères



Mise à jour incrémentale



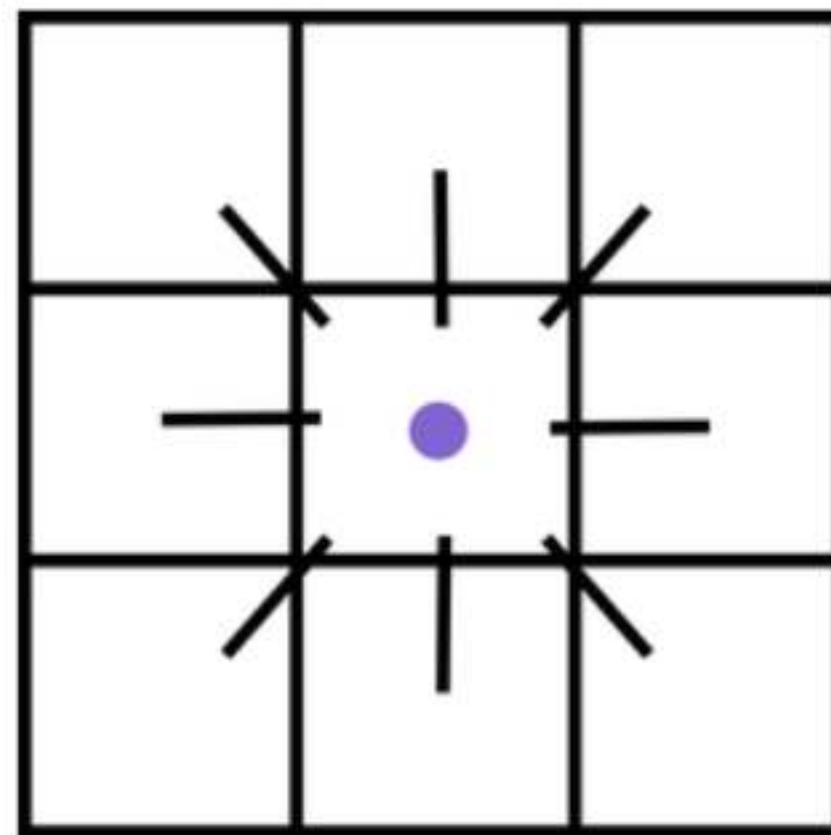
M.à.j des fonctions de forme



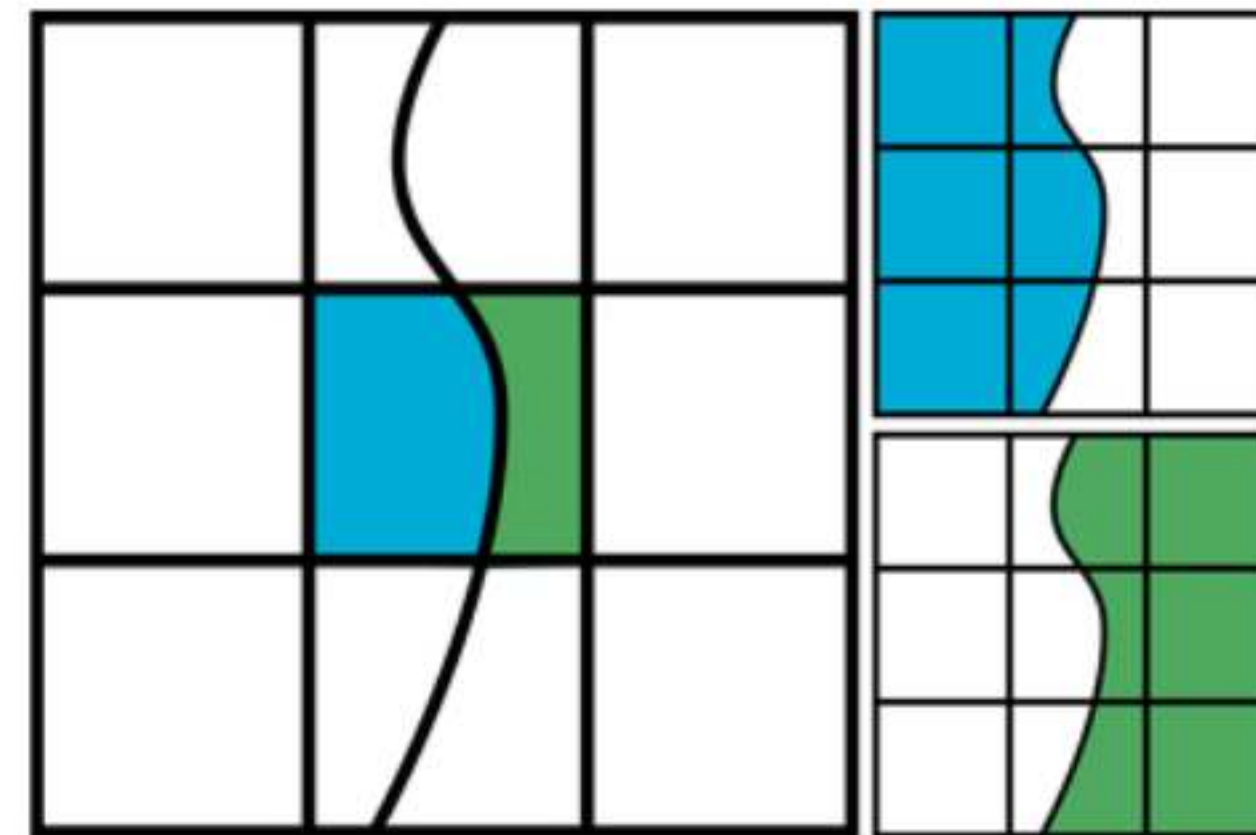
M.à.j des fonctions de forme

Grille non-variété

Plusieurs connectivités indépendantes dans une cellule



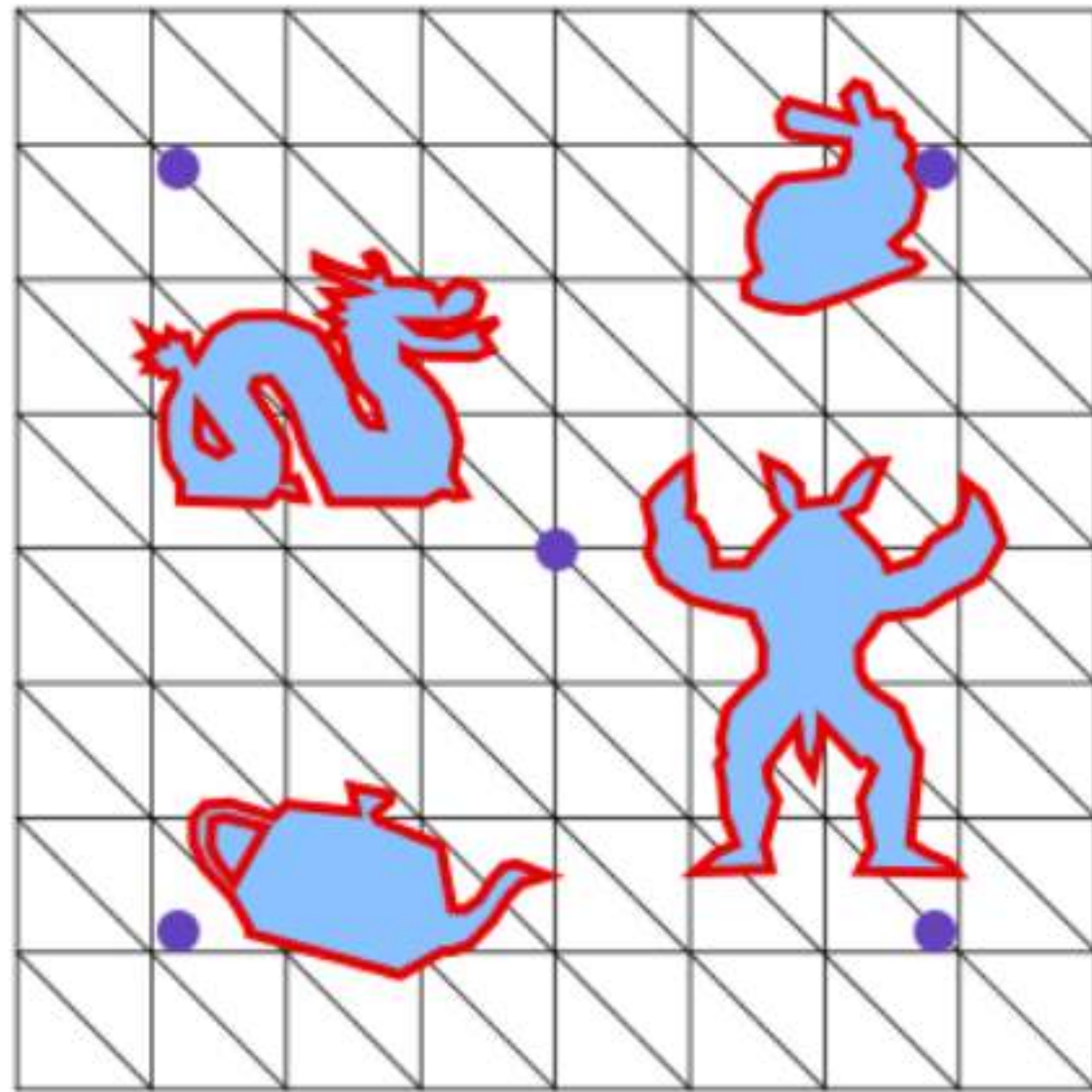
Connectivité classique
8 voisins



Deux duplicats
5 voisins chacun

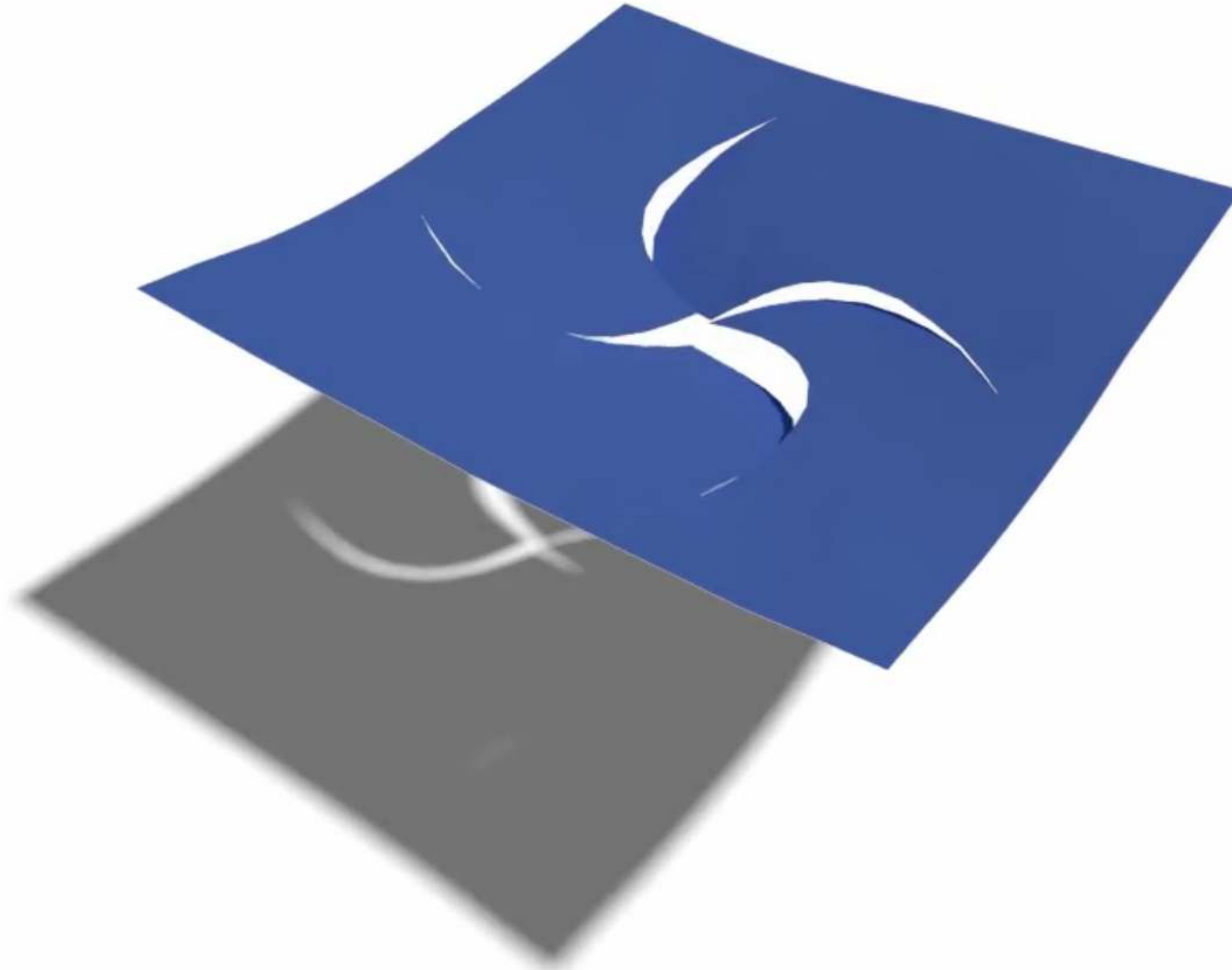
- Indépendance résolution / détails
- Gestion simple des composantes connexes

Ré-échantillonnage des repères



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

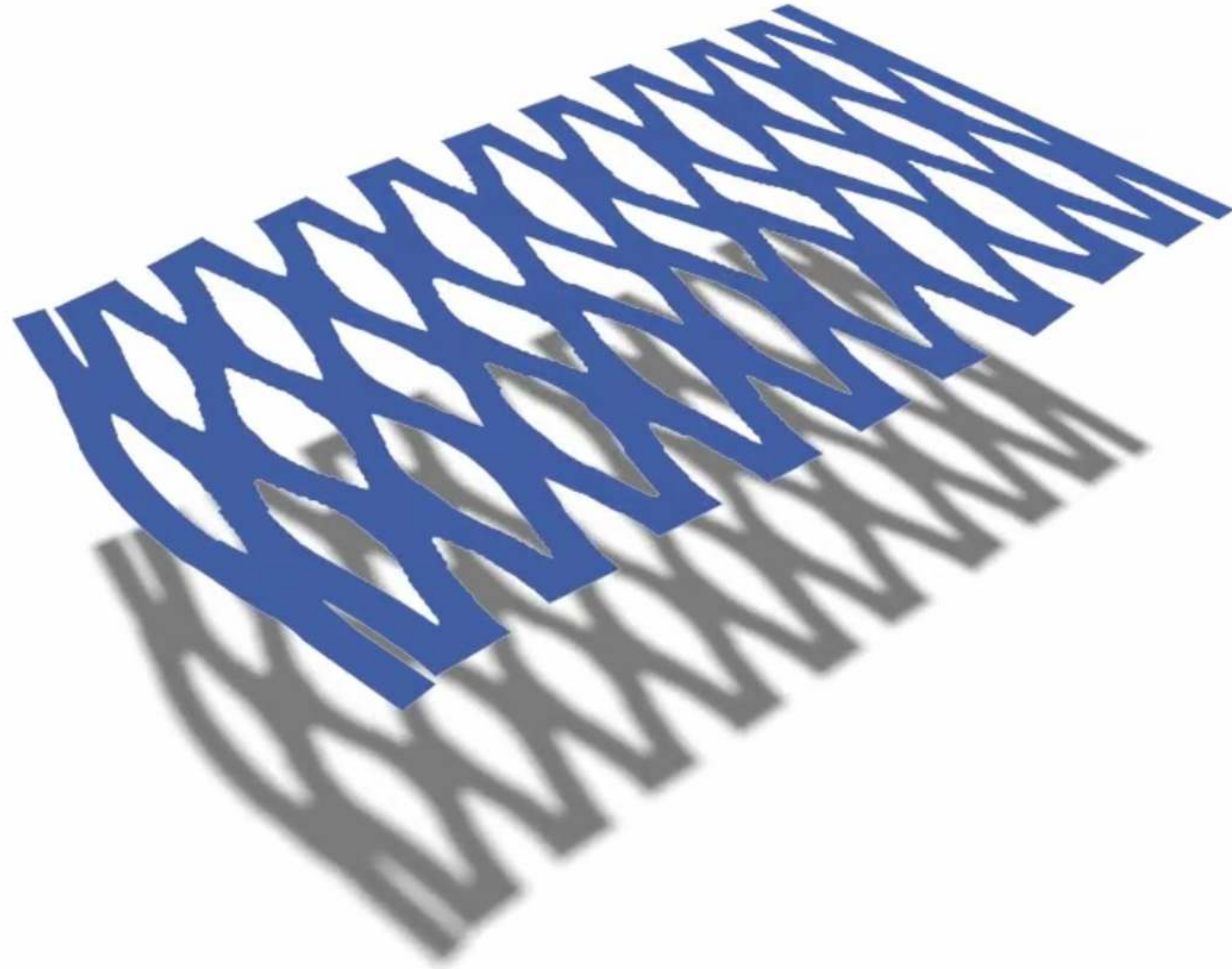
Résultats



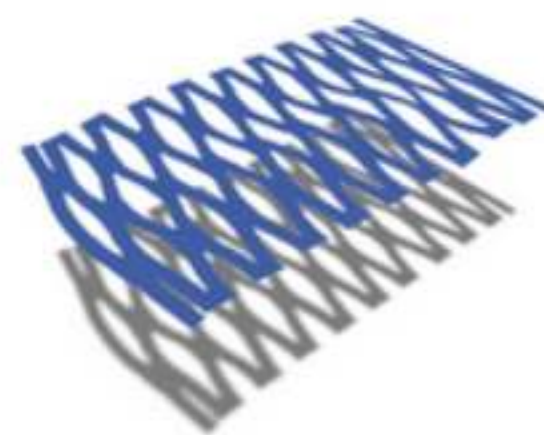
Résultats



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

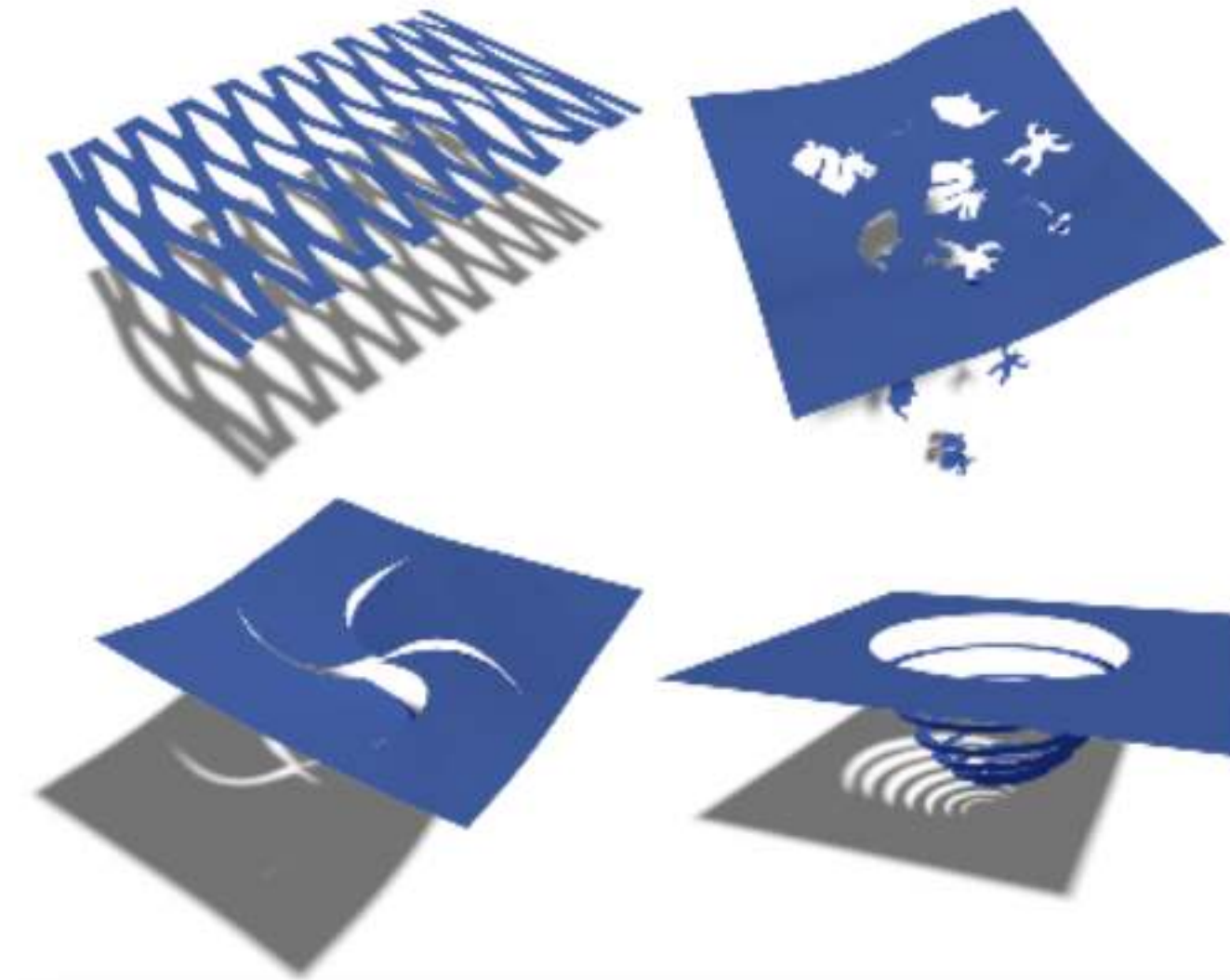
Découpe interactive/détaillée avec très peu de d.d.l

Contributions

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

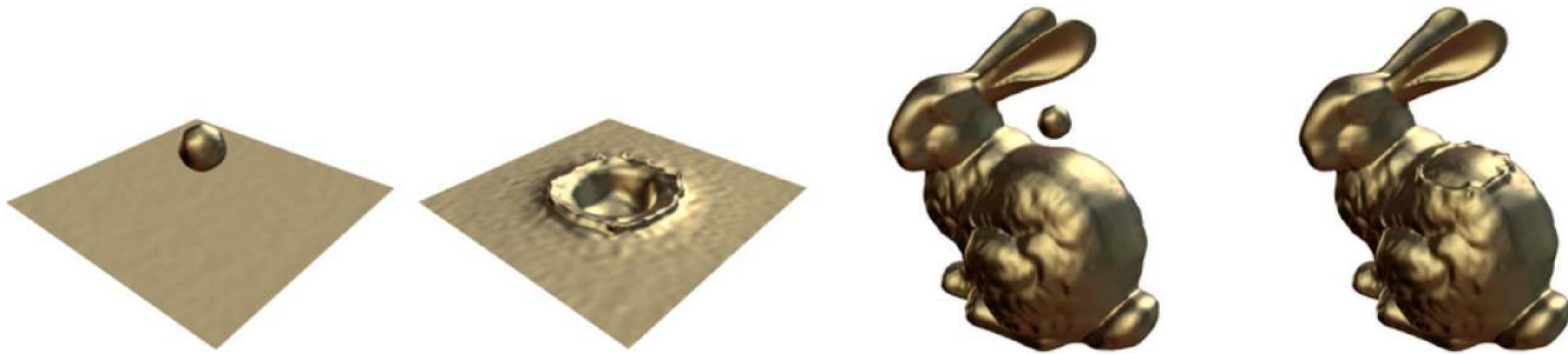
Limitations & perspectives

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



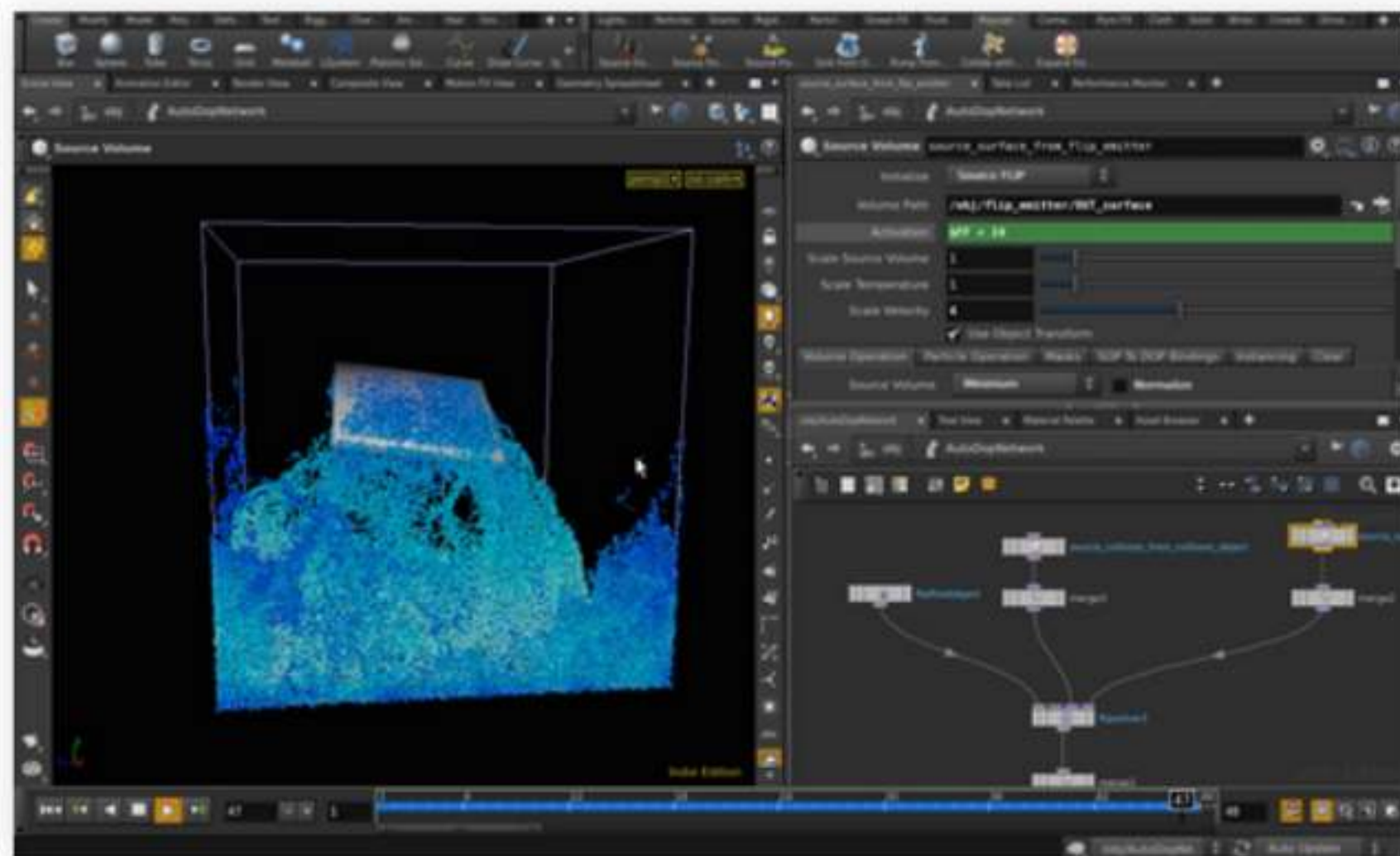
[Manteaux, Sun, Faure, Cani, O'Brien, MIG'15]

Sculpture espace-temps d'animations de liquides

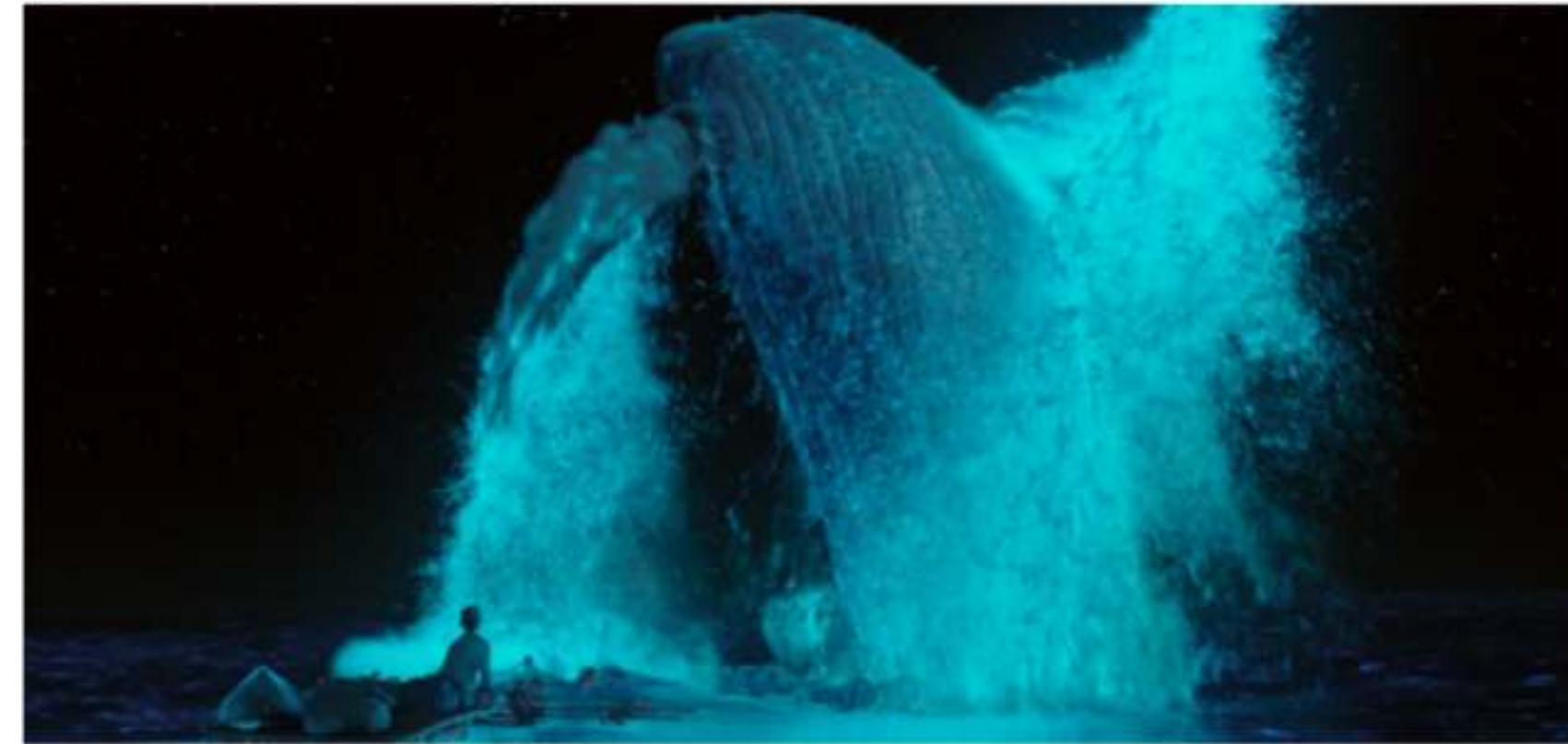


Motivations

Des centaines de simulations avant "la bonne"



[Houdini, DreamWorks]



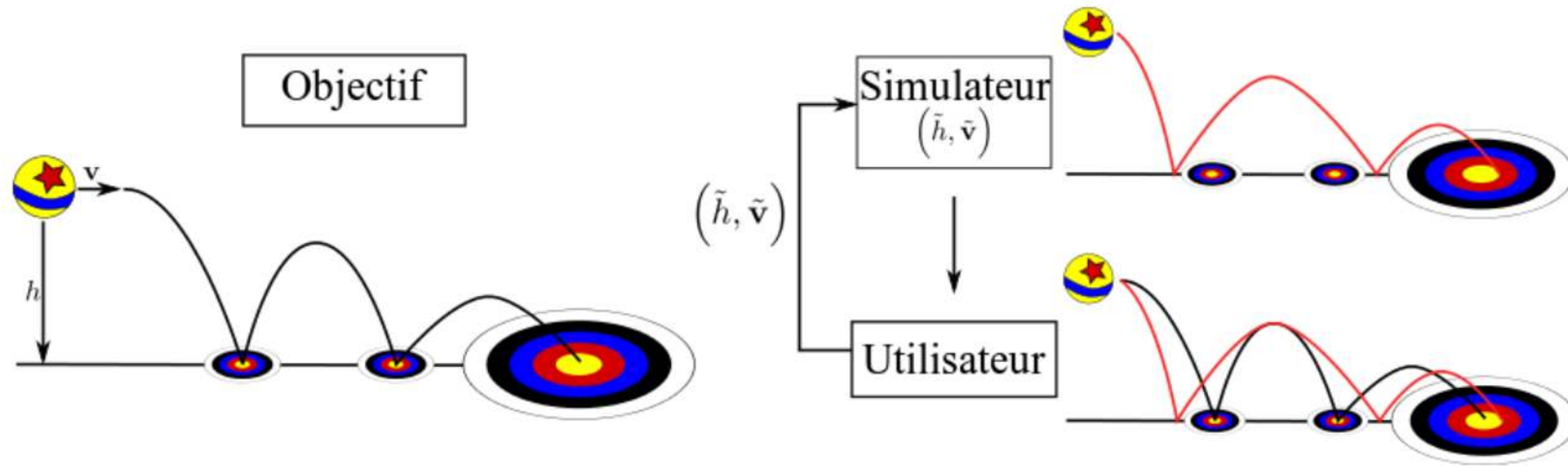
Life of Pi



X-men : days of future past

Motivation

Approche classique : Processus essai-erreur

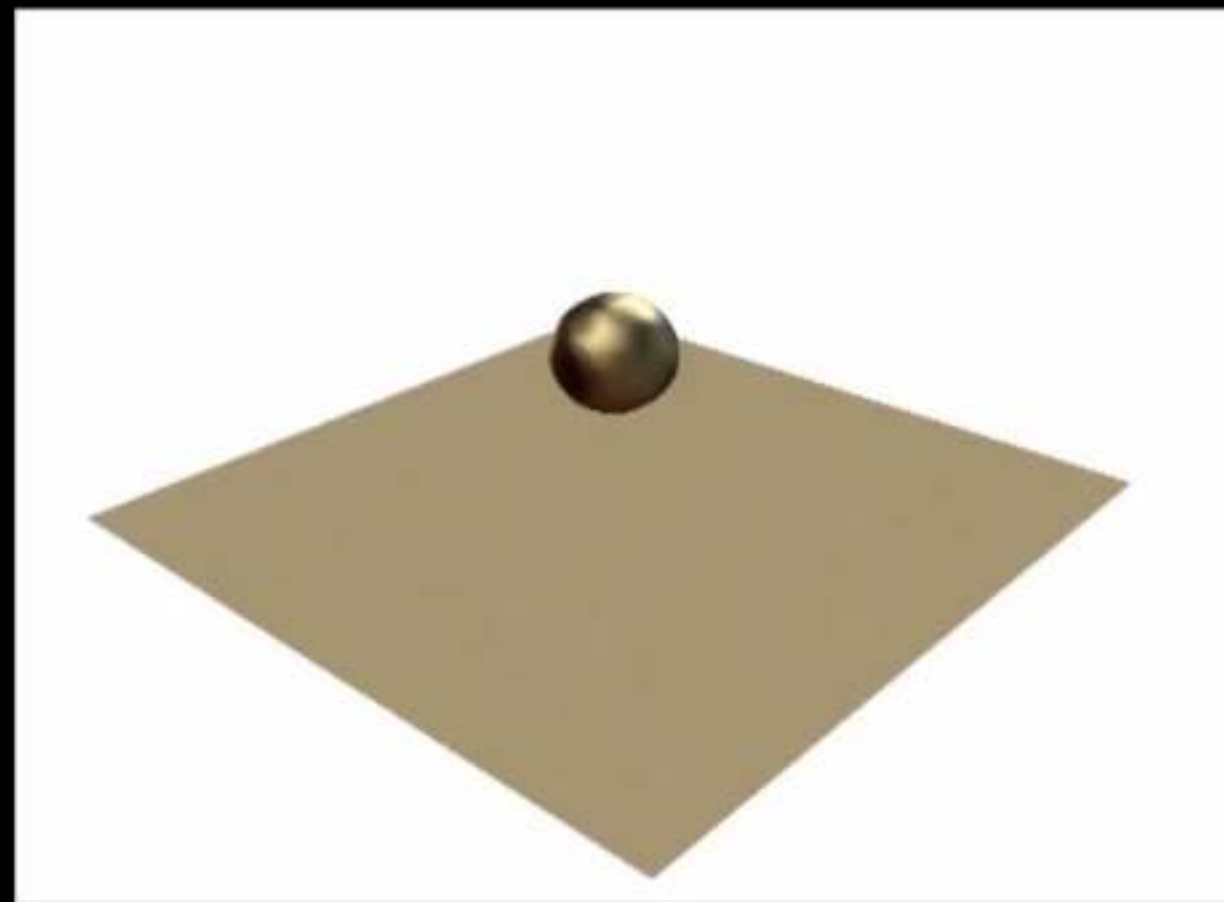


- Paramètres nombreux et indirects
- Coût calculatoire élevé
- Passage à l'échelle

Notre approche

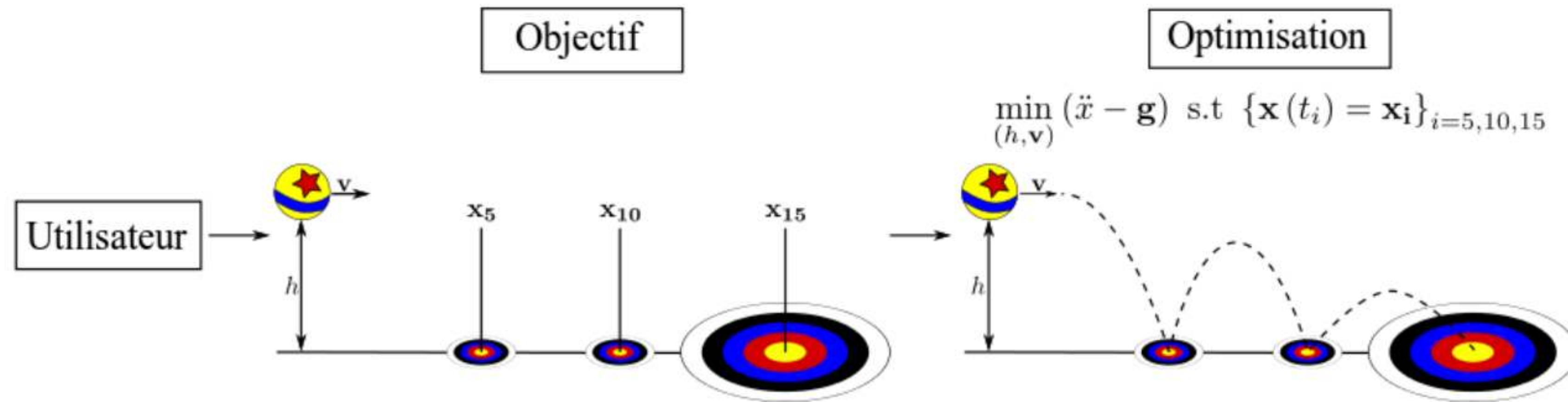
Édition Interactive - Intuitive - Réutilisable

Input animations



État de l'art : Contrôle de simulation

Contraintes spatio-temporelles [Witkin and Kass, 1988]

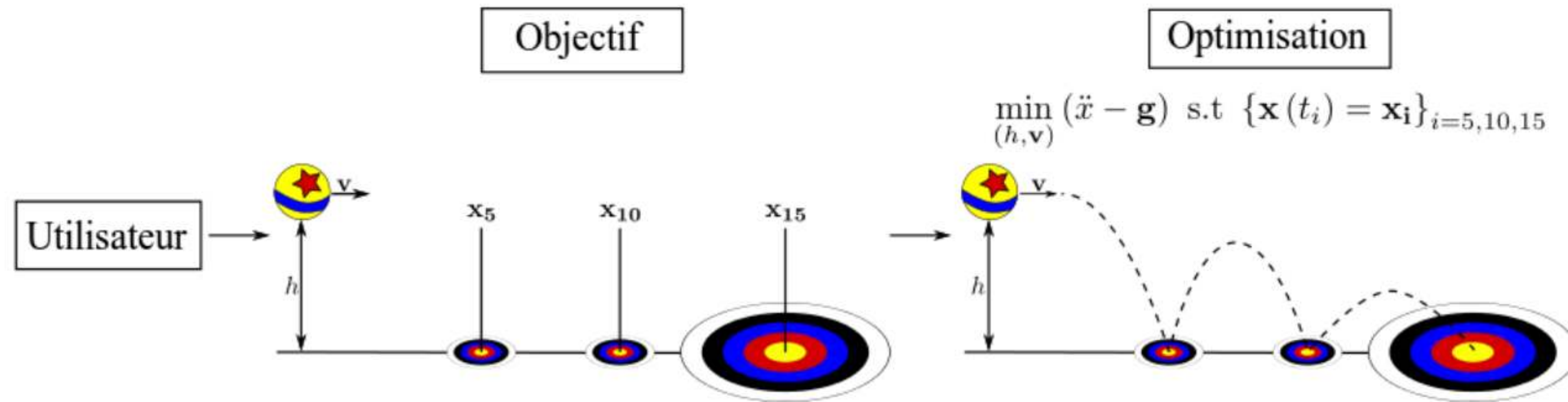


+ Contrôle direct

- Coût Élevé

État de l'art : Contrôle de simulation

Contraintes spatio-temporelles [Witkin and Kass, 1988]



+ Contrôle direct

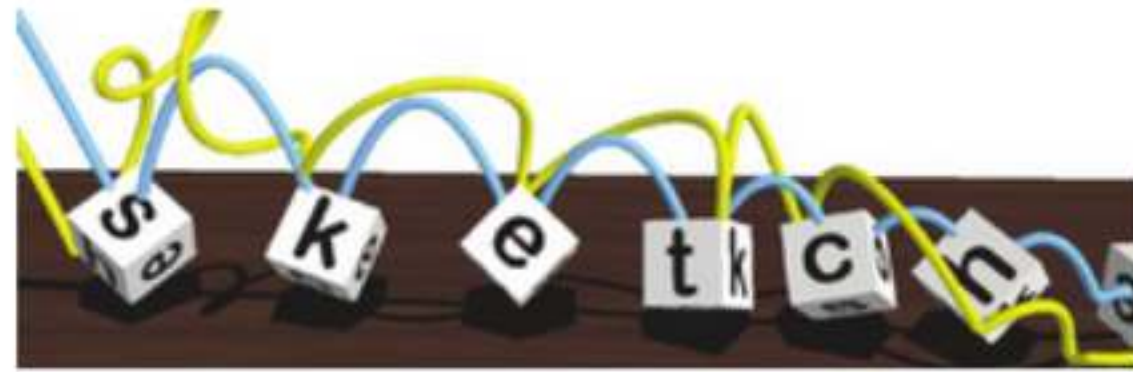
- Coût Élevé

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

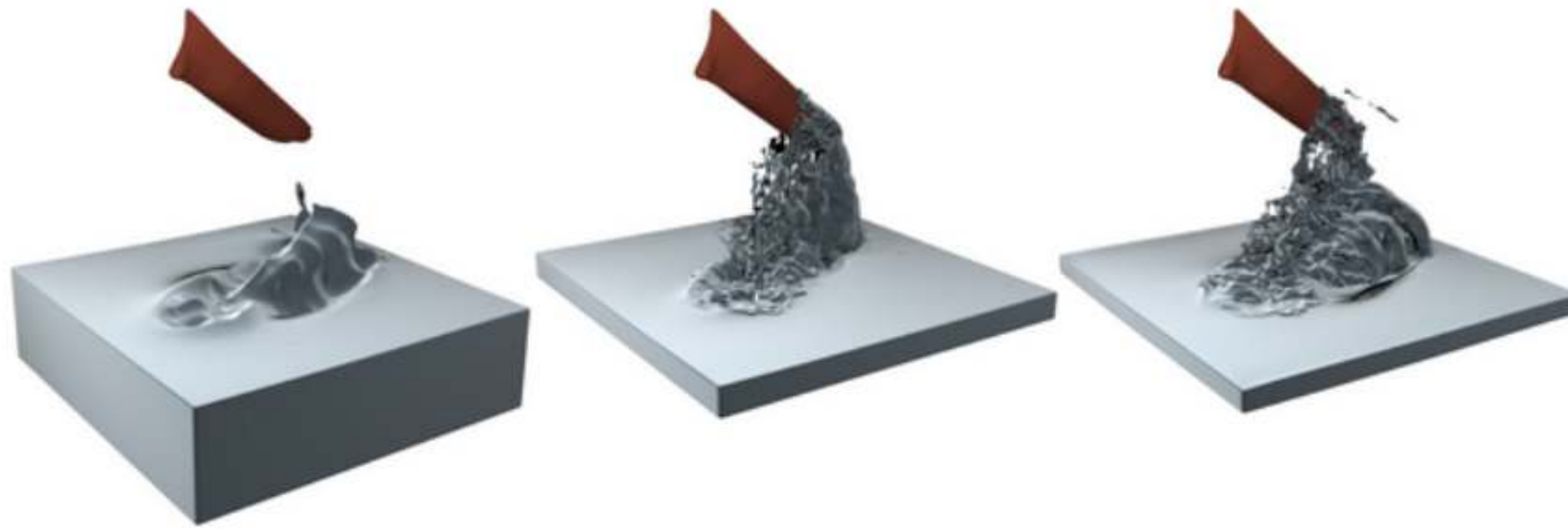
Liquides



[McNamara et al. 2004]

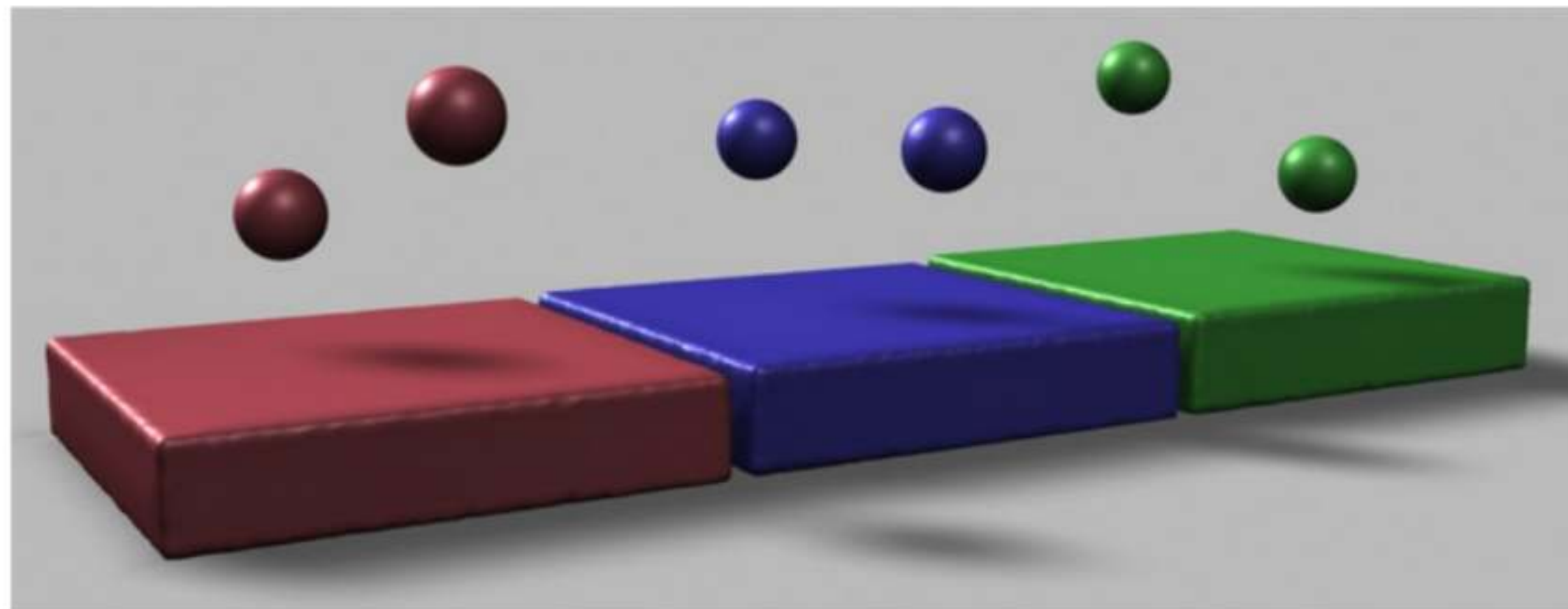
- Coût très élevé

État de l'art : Contrôle de simulation



Simulation guide [Nielsen et al. 2011]

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

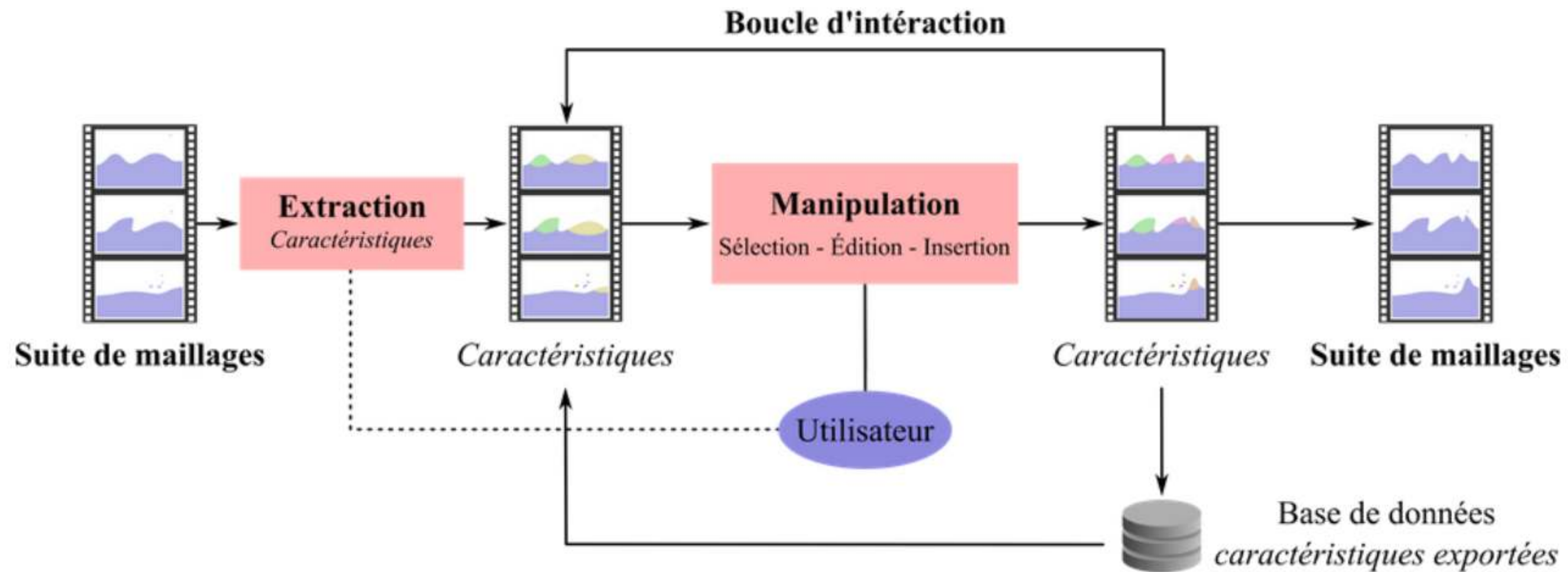


Interpolation d'animation [Raveendran et al. 2014]

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

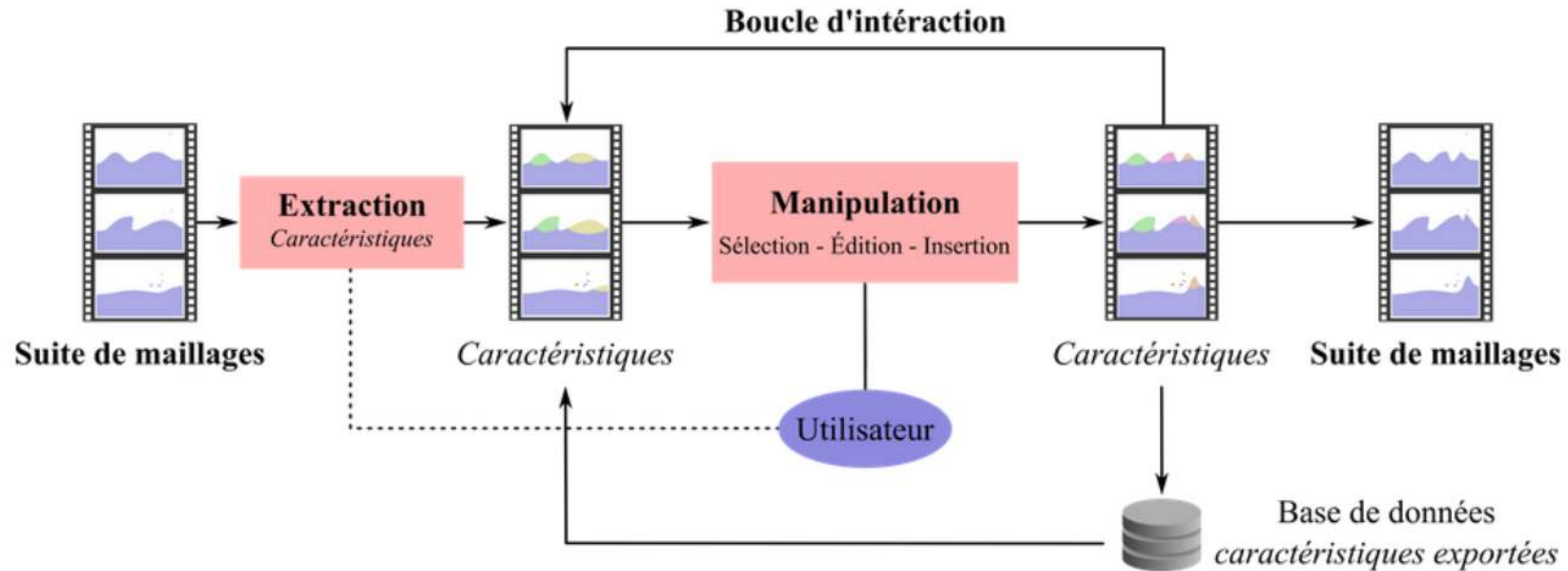
Contributions

Sculpture d'animations de liquide



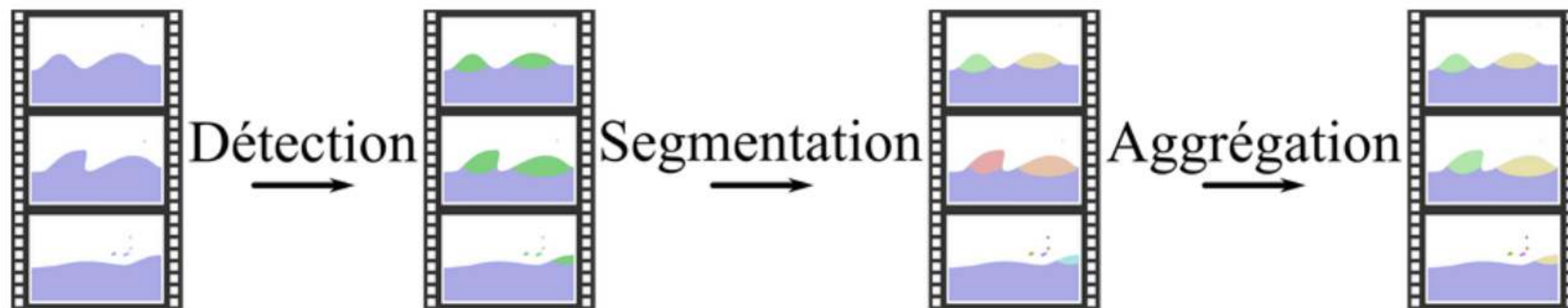
Contributions

Sculpture d'animations de liquide



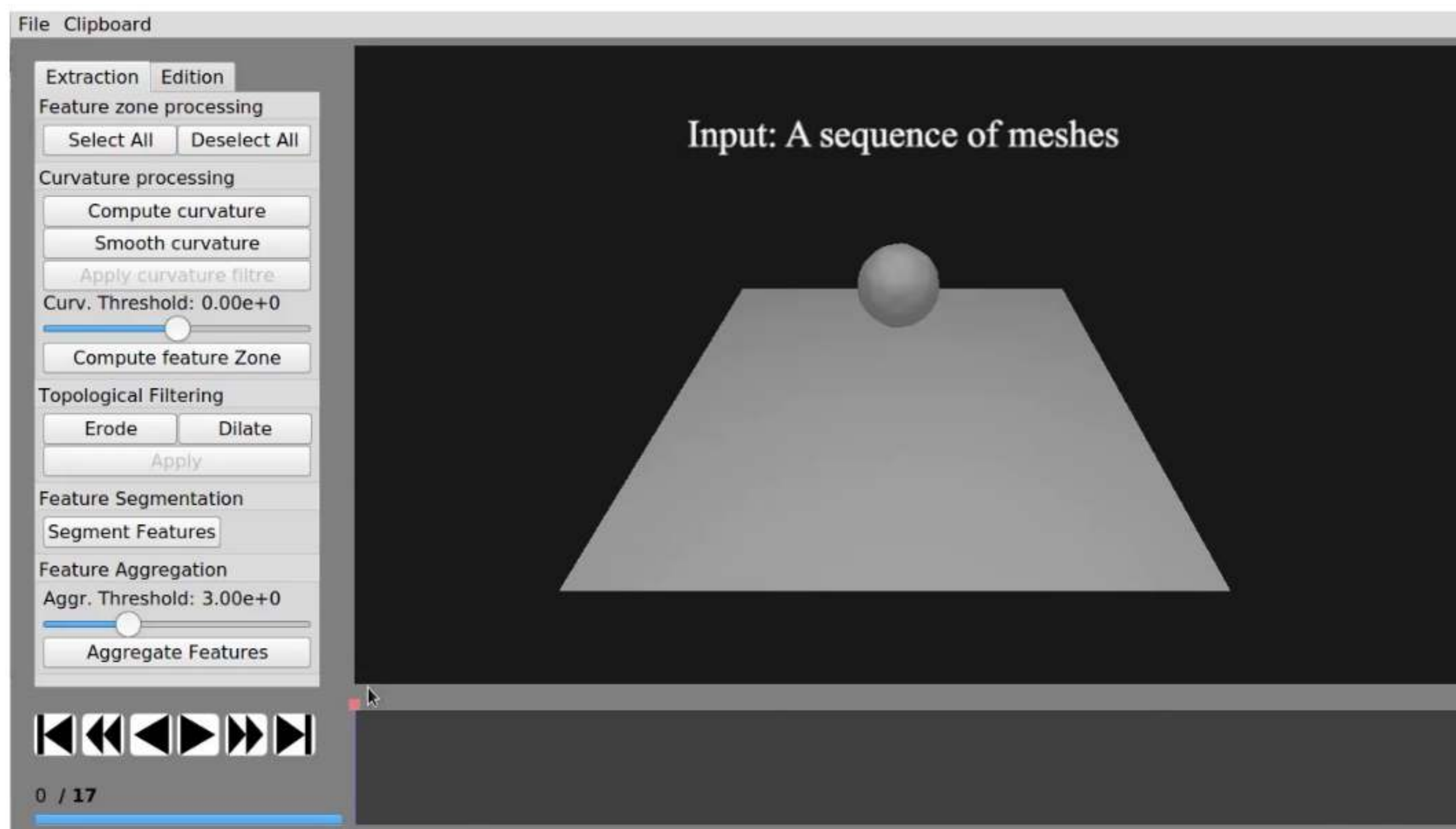
- + Pas de re-simulation : Édition/Combinaison d'animations existantes
- + Outils simples : Copier, Coller
- + Méthode indépendante du type de simulation : SPH, FLIP, ...

Extraction des *caractéristiques*



Détection

Marquage des sommets visuellement intéressants



Segmentation

Regroupement en régions d'intérêt

File Clipboard

Extraction Edition

Feature zone processing

Select All Deselect All

Curvature processing

Compute curvature

Smooth curvature

Apply curvature filtre

Curv. Threshold: 5.60e-4

Compute feature Zone

Topological Filtering

Erode Dilate

Apply

Feature Segmentation

Segment Features

Feature Aggregation

Aggr. Threshold: 3.00e+0

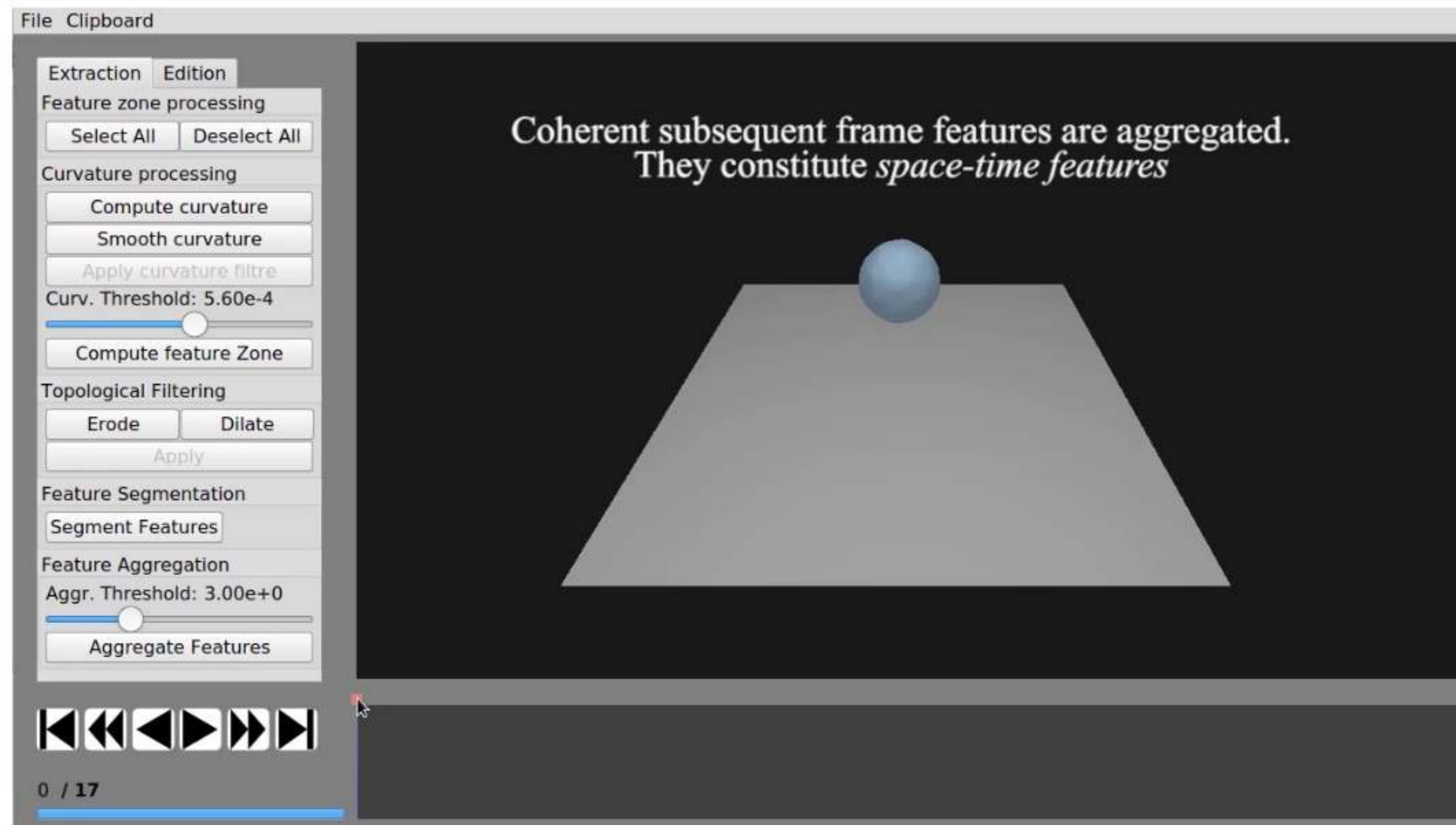
Aggregate Features

ROI are segmented into connected components
We call them *frame features*

0 / 17

Aggrégation

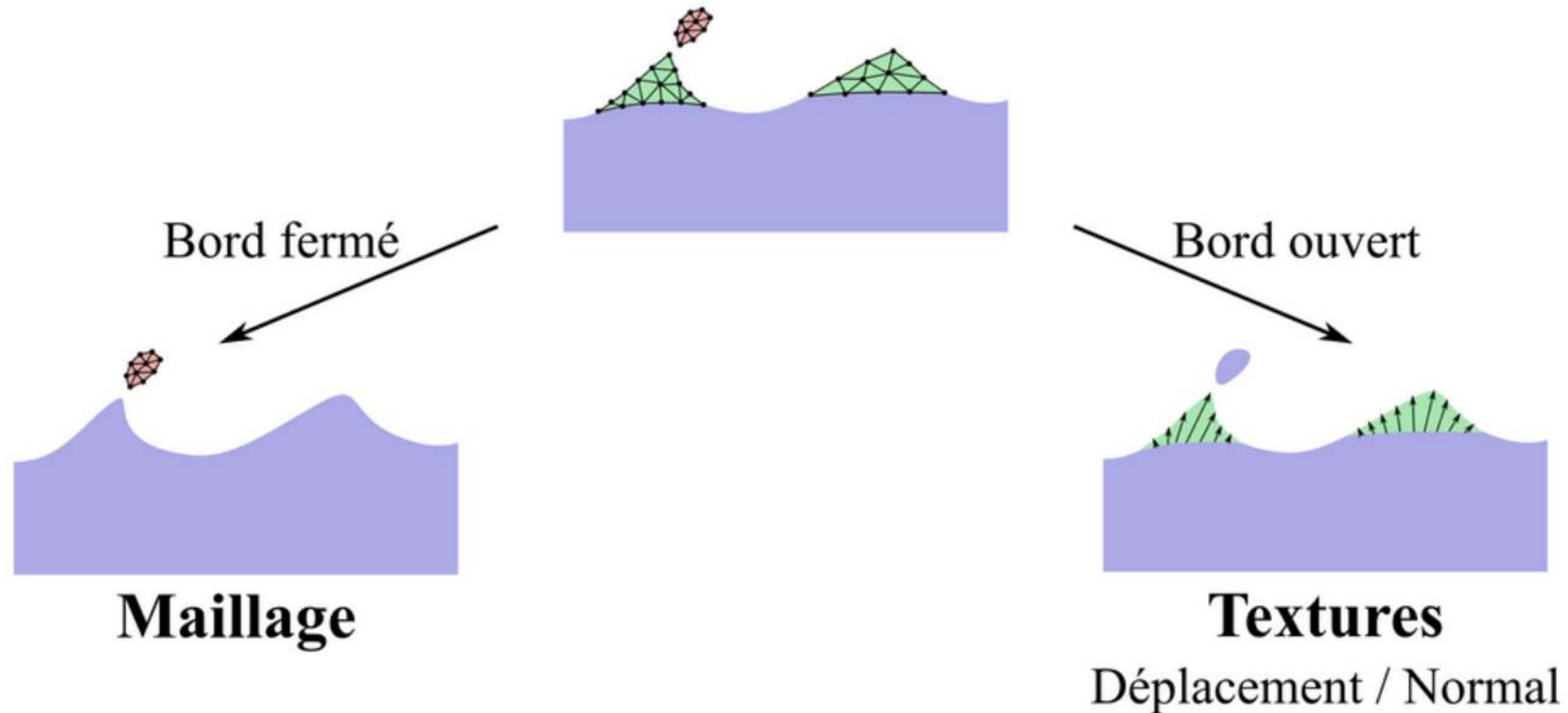
Combinaison des régions d'intérêt en *caractéristiques*



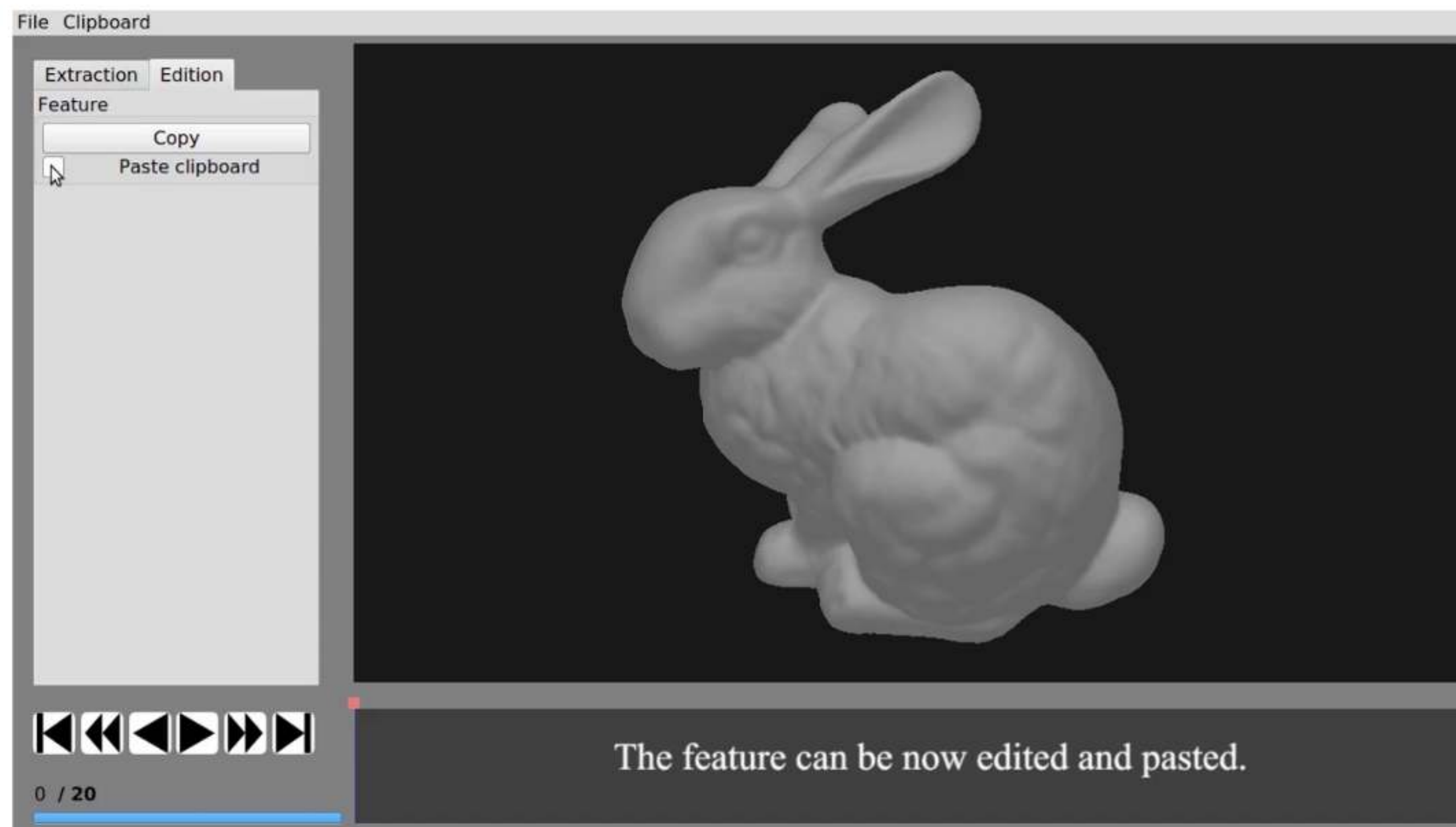
Représentation des *caractéristiques*

Indépendante de l'animation

Régions d'intérêts = {Sommet}



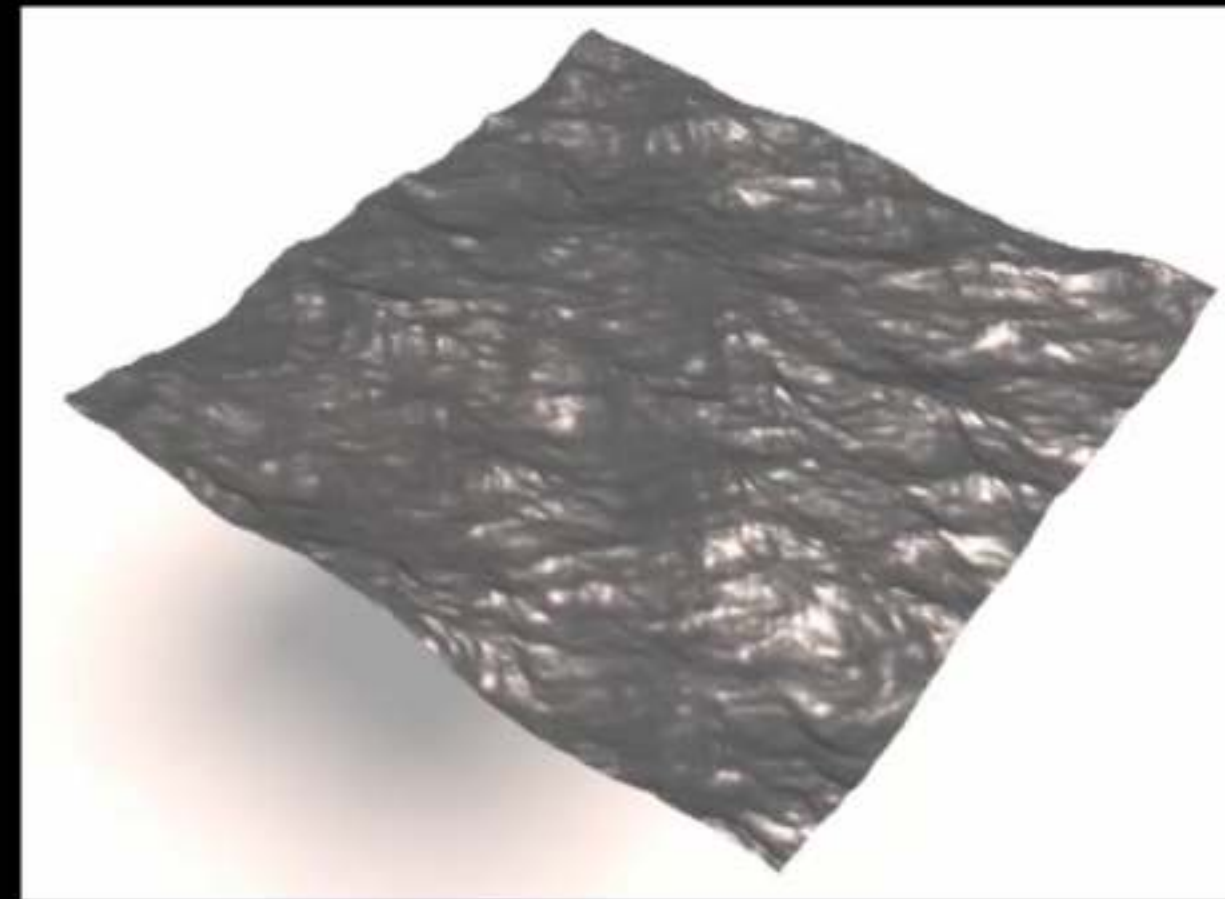
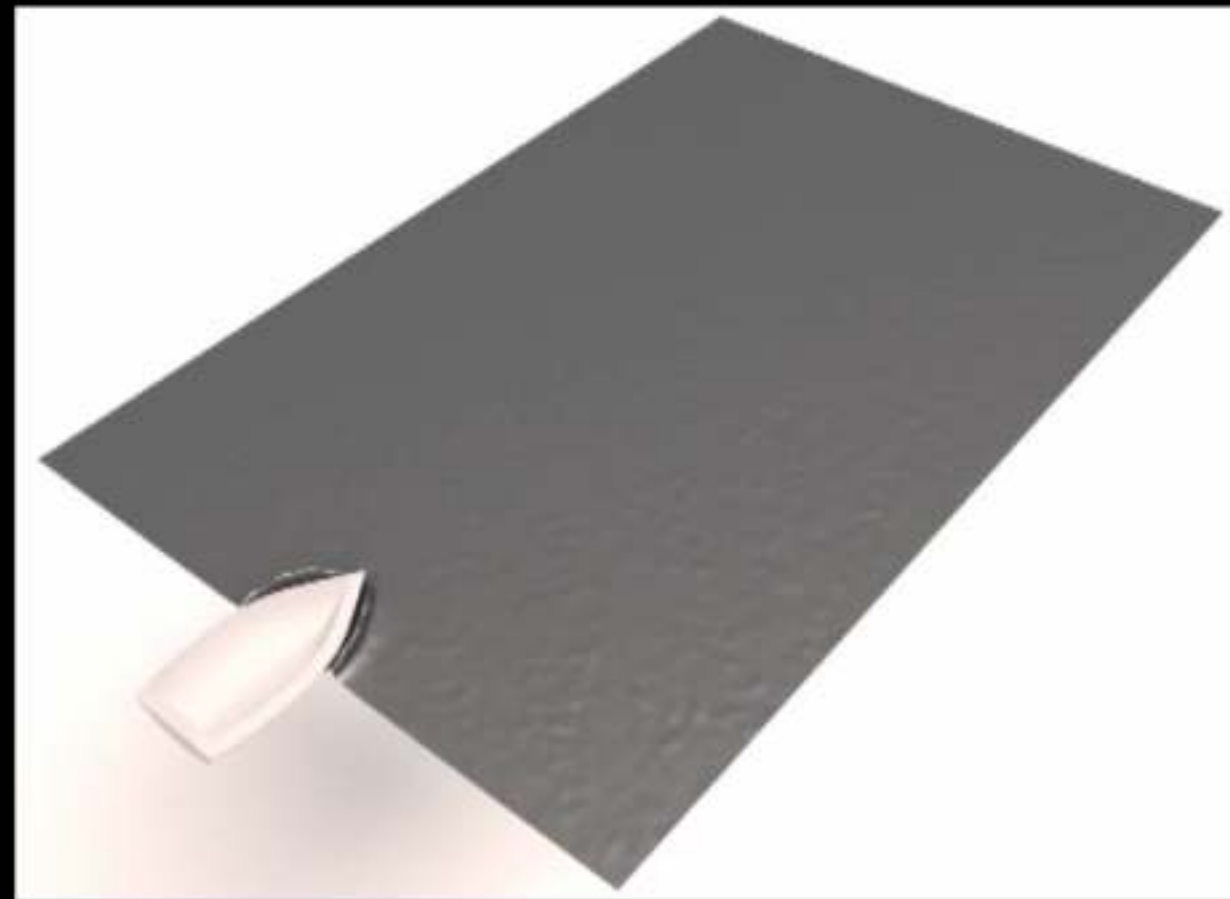
Manipulation des caractéristiques



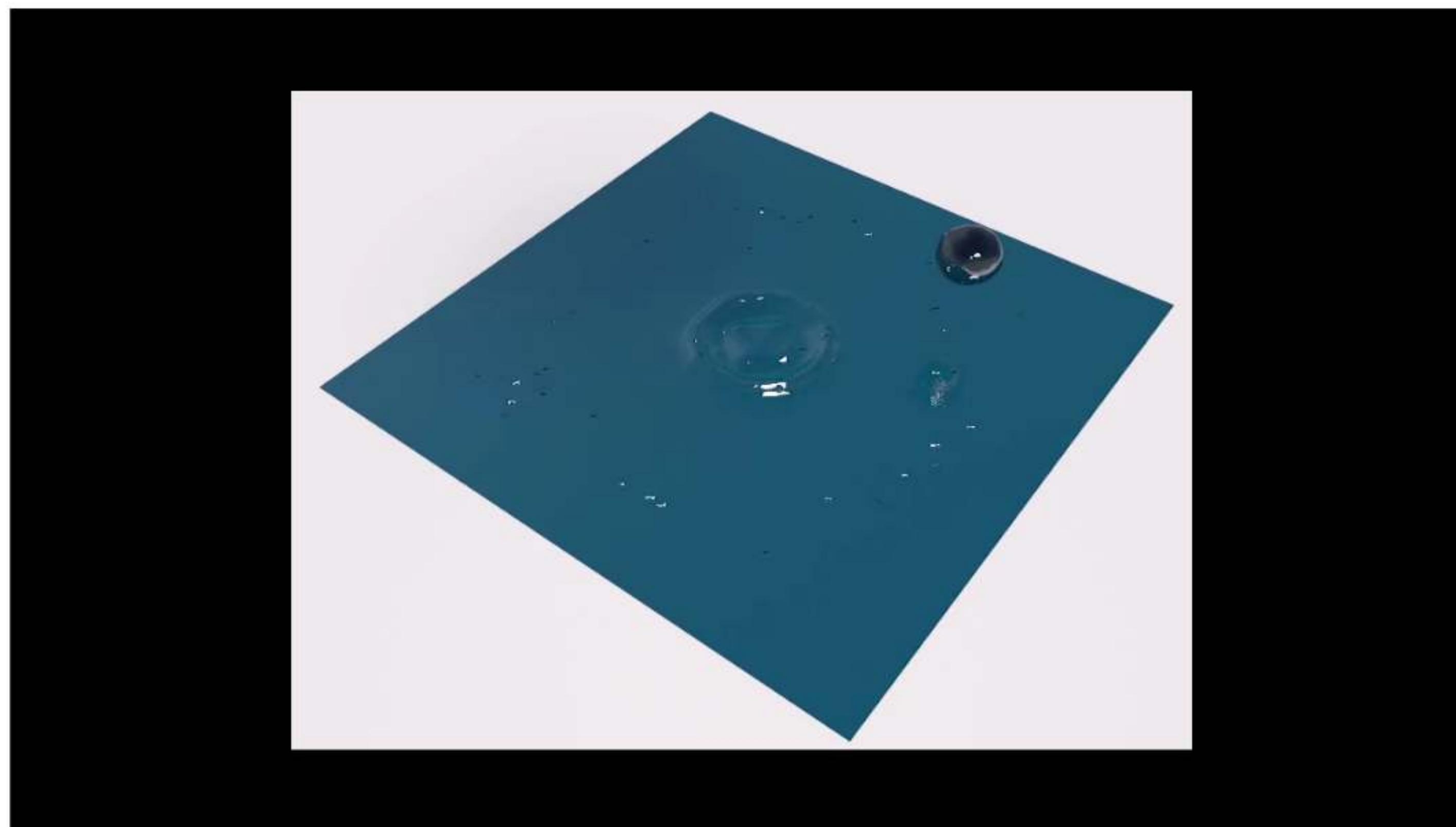
- Transformations affines
- Amplitude de déformation
- Édition de trajectoire
- Re-mappage temporel

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

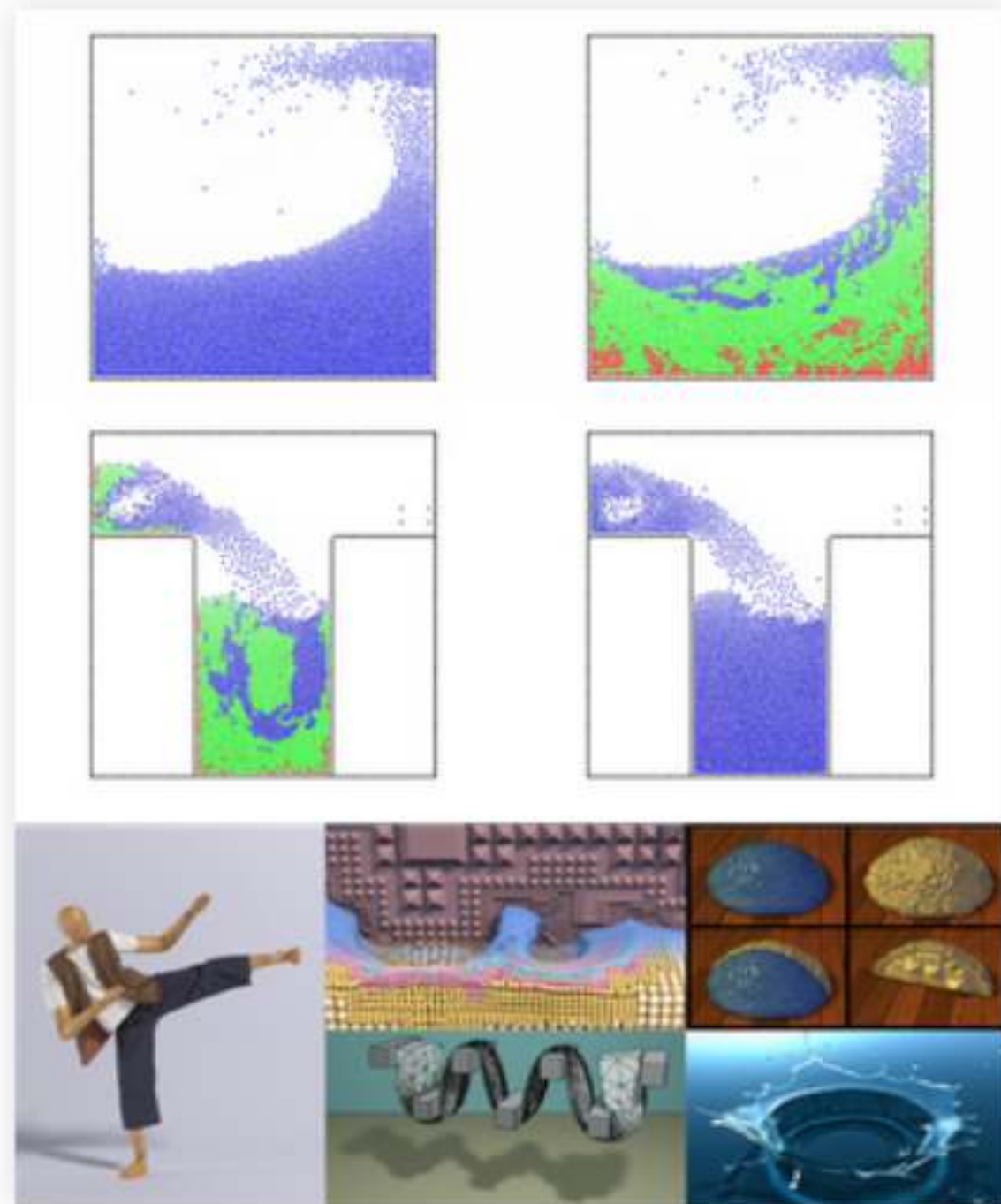
- Sélection semi-automatique
- Édition rigide



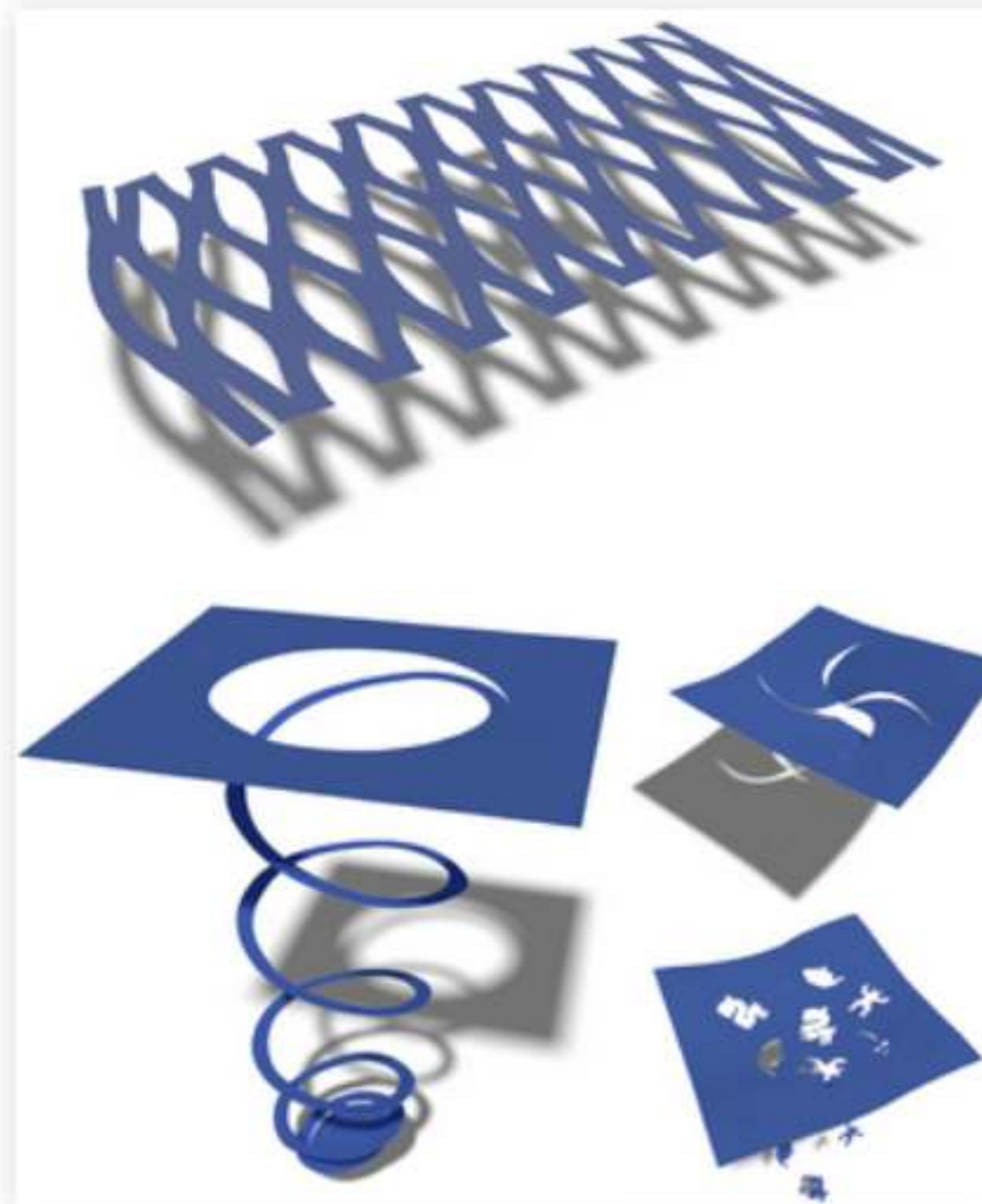
[Manteaux, Vimont, Wojtan, Rohmer, Cani, MIG'16]

Synthèse

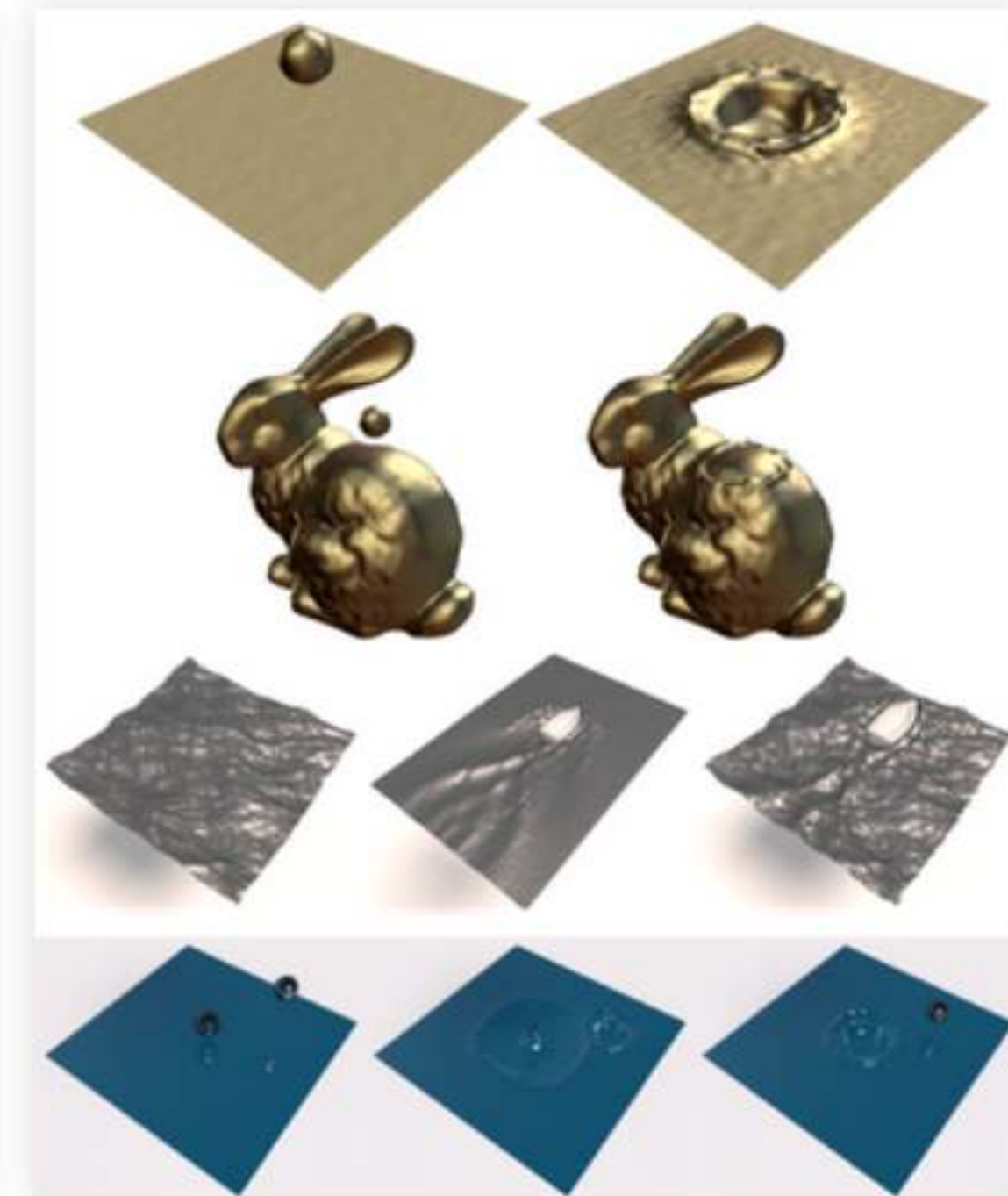
Modèles adaptatifs



Découpe d'objets fins déformables



Édition d'animation de liquide

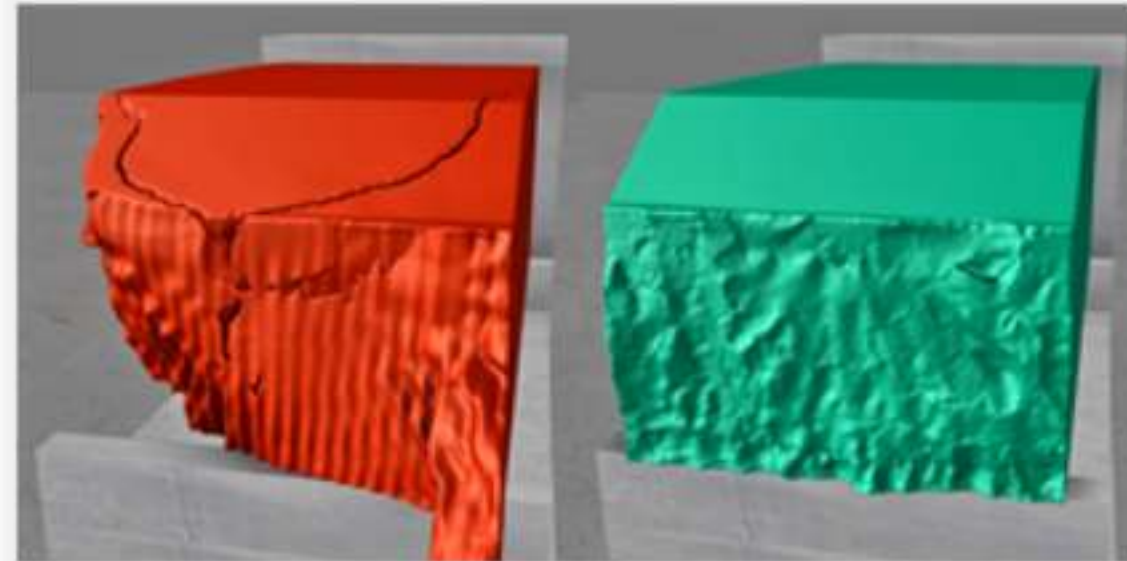


Perspectives

Modèles réduits



[Kim and James, 2009]



[Hahn and Wojtan, 2015]

Enrichissement
de simulation



[Chen et al. 2014]



[Lejembre et al. 2015]

Réalisme et expressivité



[An american tail, Amblin, 1986]



[Ponyo, Ghibli, 2009]