



---

*Animation efficace de phénomènes naturels  
des détails qui s'adaptent...*

**Marie-Paule Cani**

Univ. Grenoble-Alpes, CNRS & Inria



COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—



# *Organisation du cours*

## *« Façonner l'imaginaire »*

---

### *Partie 1 : Création numérique 3D*

- Modélisation géométrique constructive : choix d'une représentation
- Sculpture virtuelle: des modèles d'argile aux déformations de l'espace
- Modélisation 3D à partir de dessins 2D
- Réutilisation et transfert des modèles 3D

### *Partie 2 : Mondes virtuels animés*

- Création intuitive des éléments d'un paysage
- **Cours 6 : Animation efficace de phénomènes naturels** : des détails qui s'adaptent  
*Séminaire* : Simulation physique pour les mondes virtuels. François Faure
- Humains et créatures virtuelles : animation par habillages successifs
- Vers une animation expressive – marier réalisme et contrôle ?

# *Animation de phénomènes naturels*

- **Envolée des applications**
  - Jeux vidéo, effets spéciaux, films d'animation
  - Simulation pour l'environnement, la santé, le prototypage
- **Verrou scientifique : extrême complexité**
  - Nombre d'éléments et de leurs interactions
  - Complexité des formes, des mouvements, des déformations
  - Variations des propriétés au cours du temps



# *Animation de phénomènes naturels*

Marcher dans une prairie, s'entraîner à la chirurgie, froisser du papier...

## **Animation plausible et contrôlable, en temps-réel ?**

- Modèles des autres sciences non directement exploitables (science des matériaux, modèles mécaniques, calcul numérique)
- Collaborer pour identifier les connaissances à exploiter.



# *Animation efficace de phénomènes naturels*



1. Eléments de méthodologie
2. Premières scènes naturelles animées (1999-2002)
  - Coulée de lave
  - Prairie agitée par le vent
  - Océan virtuel
3. Papier froissé [*Schreck et al, 2015*]

Semaine prochaine : applications aux humains virtuels  
(corps, vêtements, cheveux)

✓ *Méthodologie*

✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

# *Création de mondes 3D*

## *Masses de données*



[@Crytek]

*Comment animer les mondes virtuels ?*

✓ **Méthodologie**

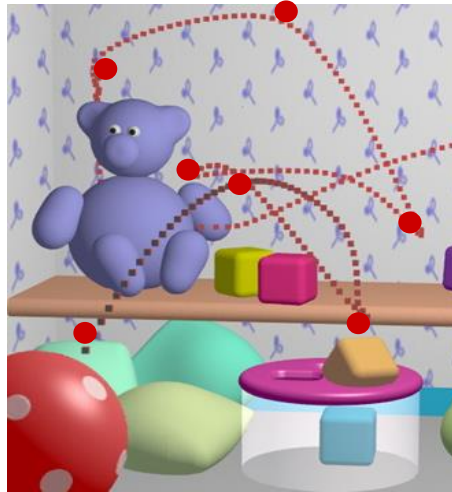
✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

# ***Animation 3D : Modèles « descriptifs »***

Spécification  
manuelle

- Clés + interpolation
- Pas d'aide au réalisme



@ Morpheo/Inria



Capture



***Inadaptés aux scènes naturelles !***

- Grand nombre d'éléments
- Mouvements tous différents
- Besoin de contrôle de haut niveau (vent, débit...)

✓ **Méthodologie**

✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

# ***Animation 3D : Modèles générateurs***

## Simulation

### **Modèle mécanique**

- Paramètres
- Conditions initiales
- Lois du mouvement

### **Au cours du temps**

- Intégration eq. différentielles  
(Fluides : Navier-Stokes)

## Cup Falling, Camera Up

100 x 100 x 100  
100 steps / s



*@Coquerelle, Cottet. LJK 2006*

Fluides biphasiques par particules de vorticité  
Plusieurs minutes par image



✓ *Méthodologie*

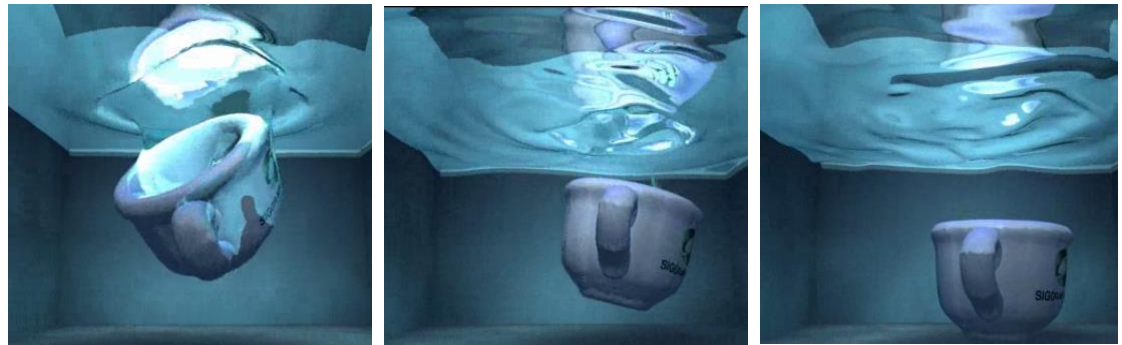
✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

## *Animation 3D : Modèles générateurs*

### Simulation

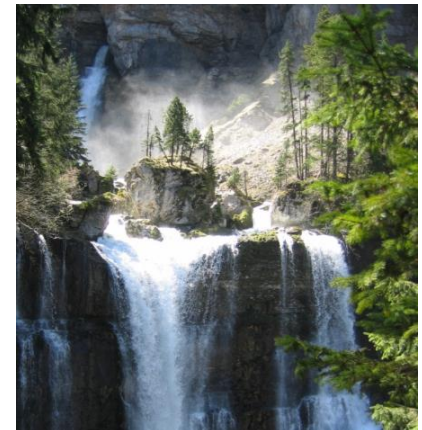
- Difficulté de contrôle
- Temps de calcul élevé



### Méthodes Procédurales

- Générer les effets sans simuler toutes les causes
- Modèles « basés connaissance » pour l'animation

*Passage à l'échelle ?*



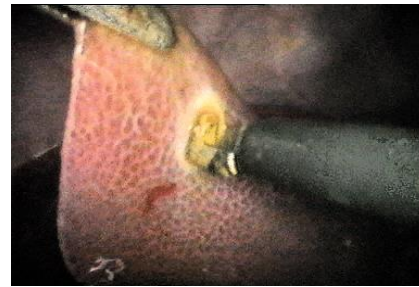
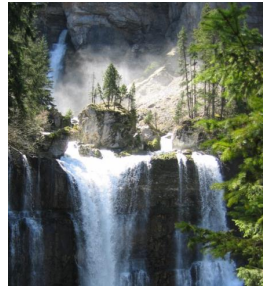
✓ *Méthodologie*

✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

## *Animation procédurale : Méthodologie*

- Exploiter les connaissances
  - autres sciences, observation directe, données réelles, films
- Approche transversale
  - géométrie / mouvement / rendu traités simultanément
- Modèles alternatifs
  - aux polygones et aux simulations par éléments finis



✓ *Méthodologie*

✓ *Premières scènes naturelles*

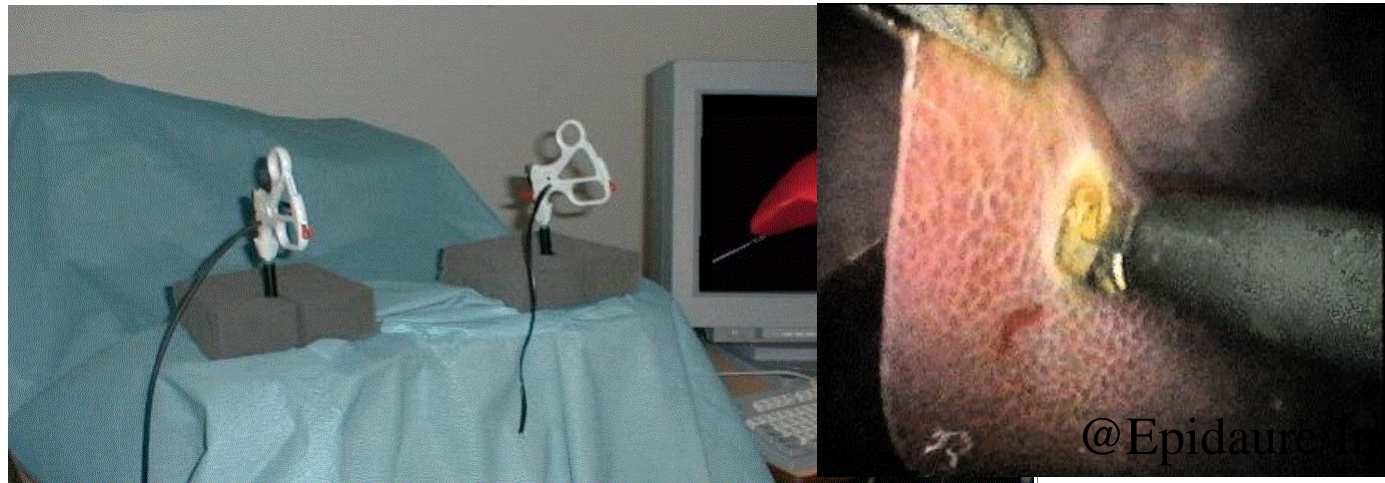
✓ *Papier froissé*

## *Chirurgie virtuelle ( fin des années 90 )*

**But** : Simulateur temps réel pour l'entraînement des chirurgiens

### **Difficultés**

- Déformations dynamiques, réalisme visuel, à *1000 Hz*
- Rendu des détails de la surface (texture, brûlure, saignements)



@Epidaure - Paris

✓ *Méthodologie*

✓ *Premières scènes naturelles*

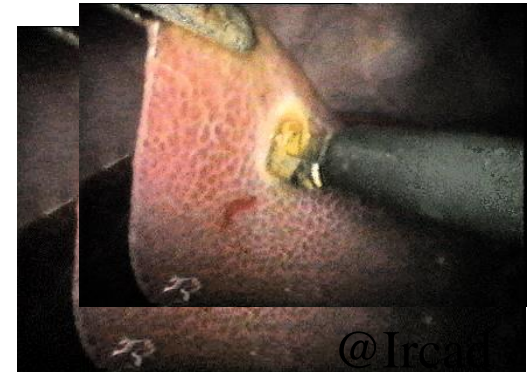
✓ *Papier froissé*

*Premier principe*

## *Hiérarchies de sous-modèles couplés*

### Caractériser les sous-phénomènes observés

- Les modéliser indépendamment
  - Choix de la meilleure représentation
  - Facilite le contrôle
- Défi : les coupler pour assurer la cohérence



### Exemple : Chirurgie virtuelle

1. Déformations à grande échelle
2. Surface en contact avec les instruments
3. Brûlures, saignements



✓ **Méthodologie**

✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

## **Second principe**

### ***S'autoriser des représentations alternatives***

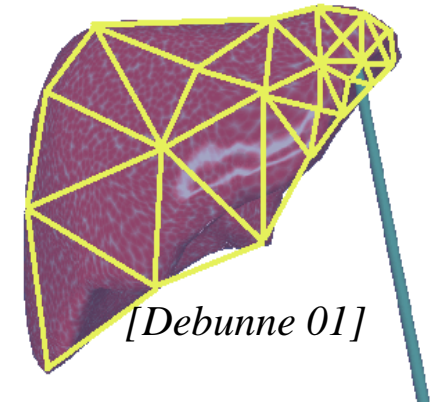
#### **Choisir librement entre**

- Animation physique ou descriptive
- Géométrie 3D procédurale
- Texture animée

#### **Exemple : Chirurgie virtuelle**

1. Déformations à grande échelle
2. Surface en contact avec les instruments
3. Brûlures, saignements

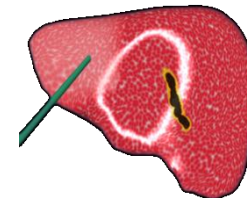
*modèle élastique*



*collisions temps-réel*



*texture animée*



✓ **Méthodologie**

✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

## *Troisième principe*

# *Adapter dynamiquement les modèles*

- Changer de modèle au besoin
  - ou *adapter sa résolution* en temps et espace
  - Approximer le même comportement
  - Critères de transition à définir (erreur – stabilité)
  - Cacher les transitions à l'utilisateur

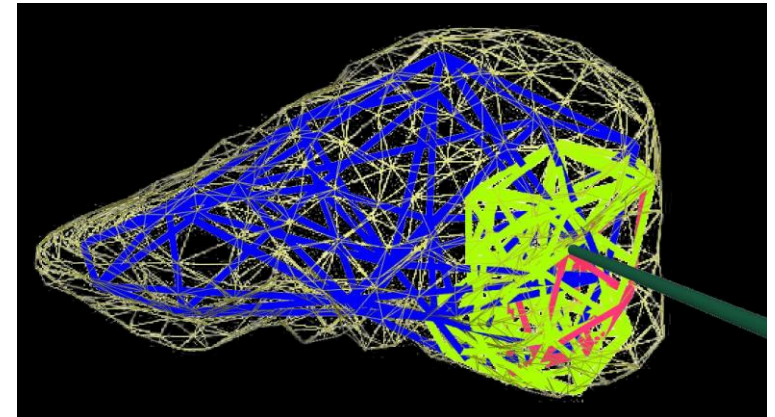
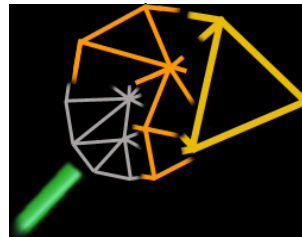


[Debunne 01]

### **Exemple: Chirurgie virtuelle**

Modèle élastique adaptatif

- Hiérarchie pré-calculée
- Tenseur de Green (mêmes modes vibratoires)
- Points fantômes interpolés



✓ *Méthodologie*

✓ *Premières scènes naturelles*

✓ *Papier froissé*

# *Synthèse*

## *Etapes de l'étude d'un phénomène naturel*

---

1. Caractériser les sous-phénomènes observés
2. Les représenter par des modèles couplés, de nature différente
3. Adapter dynamiquement ces modèles aux besoins
  - Résolution spatiale ou temporelle adaptatives
  - Transitions entre niveaux de détails
4. Valider en comparant au réel : « réalisme visuel »

*Application aux Scènes Naturelles*

→ *Trois « premières » au début des années 2000*

- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

## *Exemple 1 : Coulées de lave*

**But :** Réalisme visuel

### **Difficultés**

- Liquide visqueux
  - Séparation, fusion
- Comportement variable
  - Viscosité fonction de température
- Deux échelles importantes
  - Trajectoire globale
  - Détails de la croute, en cohérence avec la coulée





- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

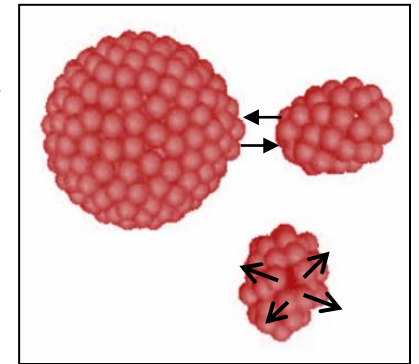
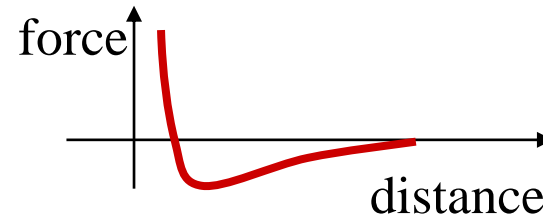
## *Préliminaire : Substance déformable*

### Sous-modèles

#### 1. Mouvement - déformations

- ✓ Système de particules  $[m, X, V]$
- ✓ Loi de la dynamique  $\sum F = m A$

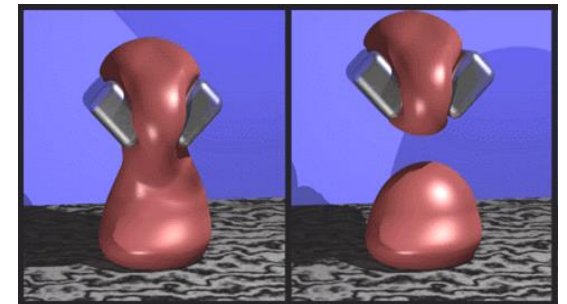
Forces d'attraction/répulsion de « Lennard-Jones »



#### 2. Surface : surface implicite à squelettes

### Couplage

- Particules utilisées comme squelettes
- *Rétroaction* : Transmettre aux particules
  - forces de collision / séparations en différents morceaux

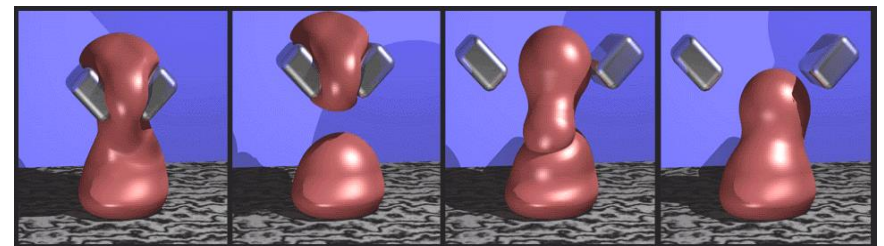
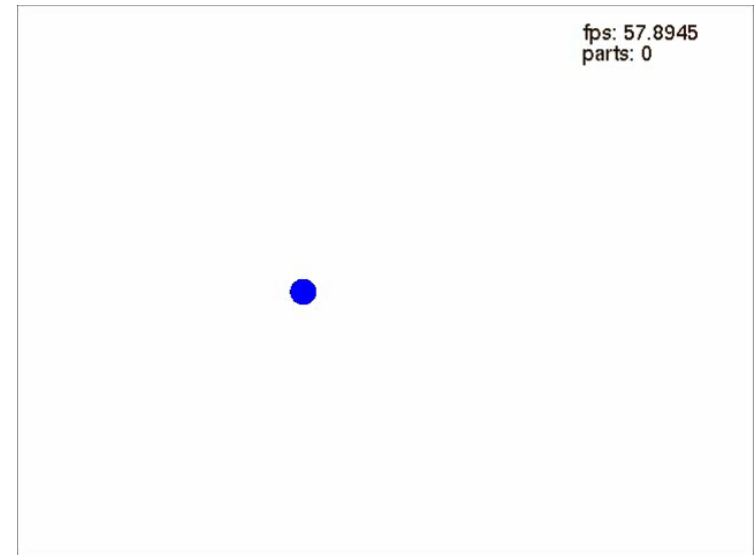


- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

## *Préliminaire : Substance déformable*

**Boucle d'animation :** A chaque instant

- Pour chaque particule
$$V(t+dt) = V(t) + \sum F(t)/m dt$$
$$X(t+dt) = X(t) + V(t) dt$$
- Pour chaque groupe de particules
  - Calculer surface implicite
- Détecter surfaces en collision
  - Faire remonter les forces
- Mettre à jour les groupes
  - Permettre séparation ou fusion



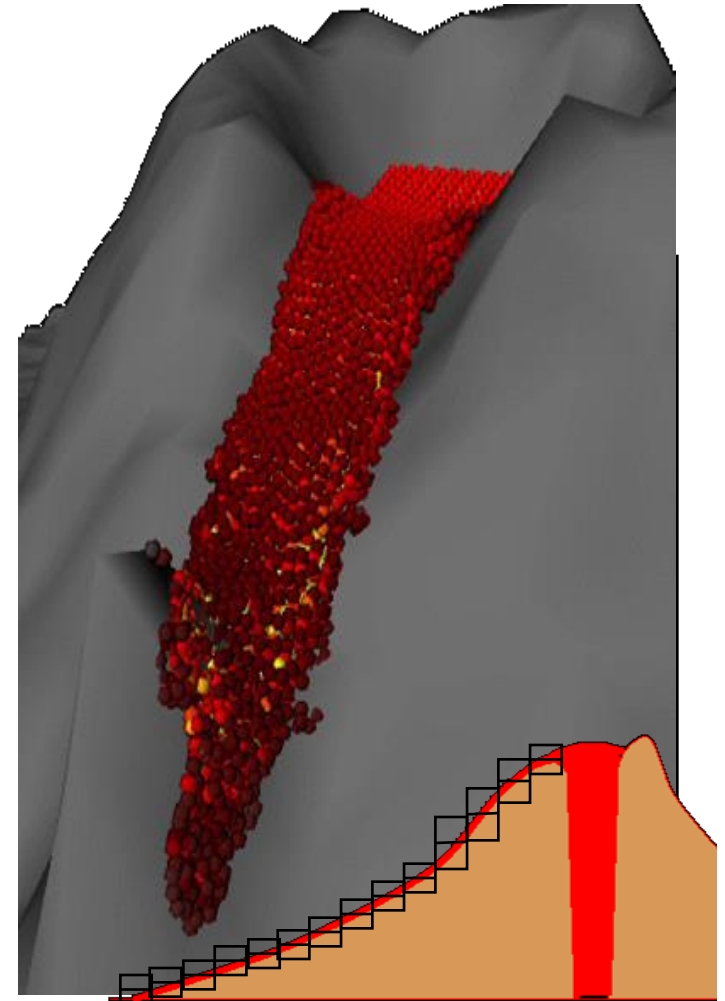
[Desbrun 1997]

- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

## *Coulées de lave*

### *Sous-phénomènes*

- **Trajectoire**
  - Substance visqueuse
  - Viscosité fonction de la température
- **Forme 3D**
  - Séparations / fusions
- **Détails de la croûte**
  - Animés avec le flot
  - Aspect fonction température

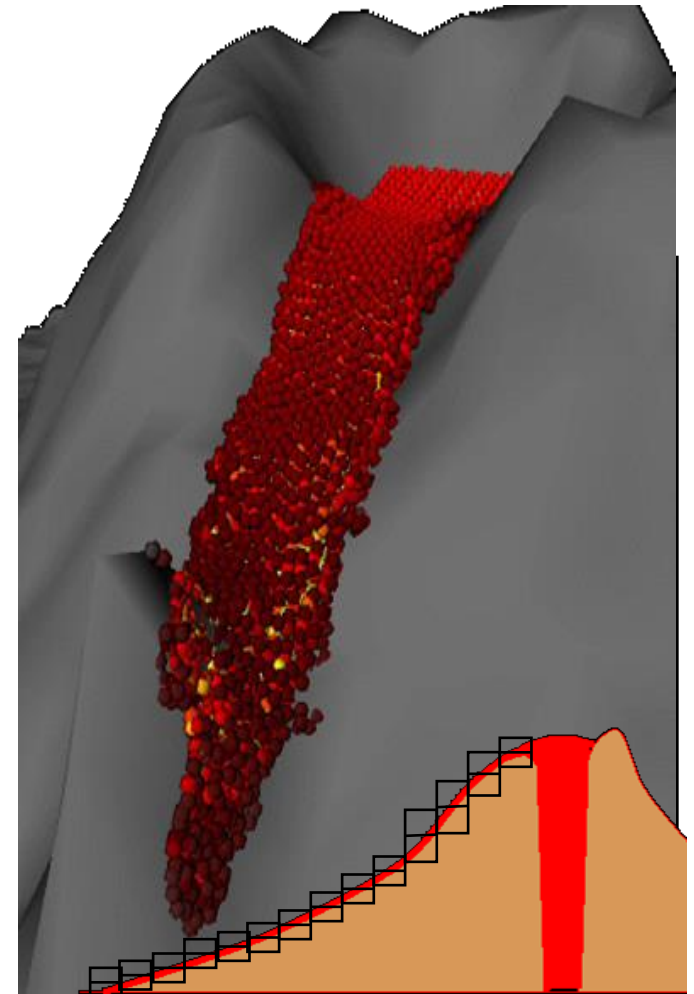
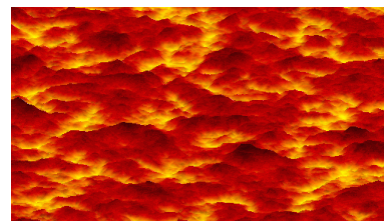
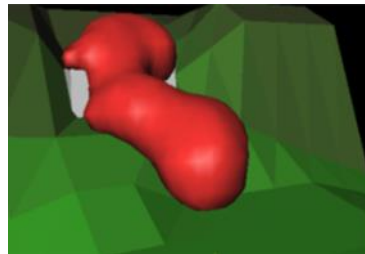


- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

# *Coulées de lave*

## *Sous-modèles*

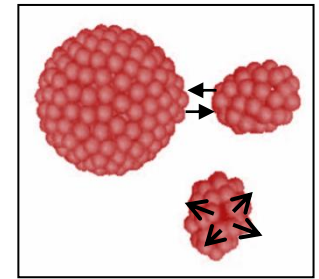
- **Trajectoire**
  - Particules + Température  $[m, X, V, T]$
  - Diffusion de T: eq. de la chaleur
- **Forme 3D**
  - Surface implicite
- **Détails de la croûte**
  - Texture animée
  - Nature fractale



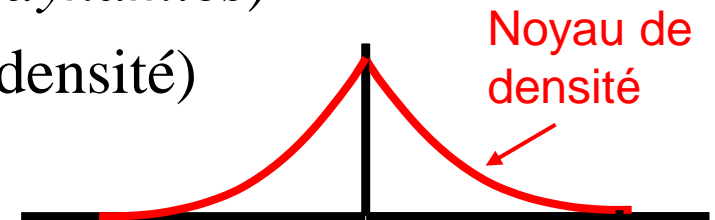
- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

## *Choix du système de particules*

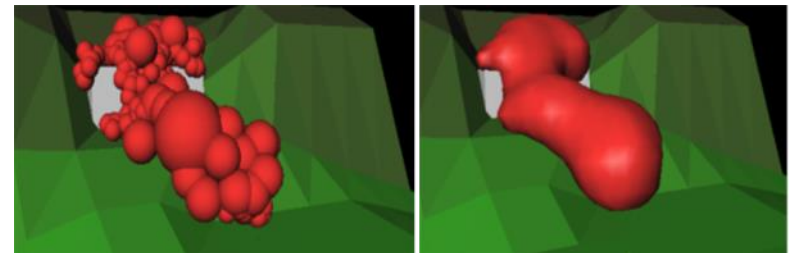
- Masses ponctuelles et forces de *Lennard-Jones*  
Forte dépendance à la résolution



- Particules SPH (*Smoothed Particles Hydrodynamics*)  
Equation d'état : Pression  $P = k (\rho - \rho_0)$  (densité)  
Les forces d'interaction en dérivent



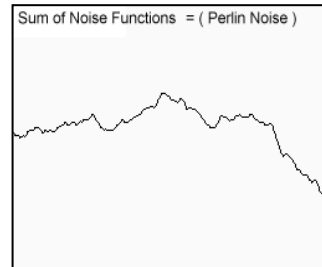
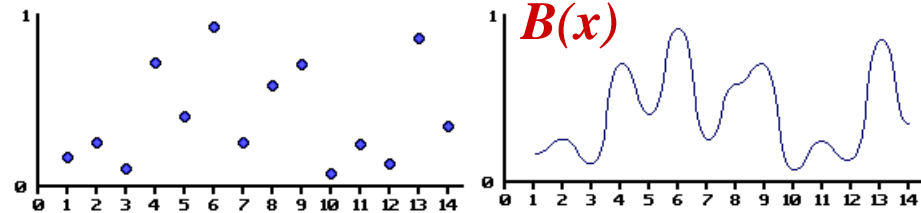
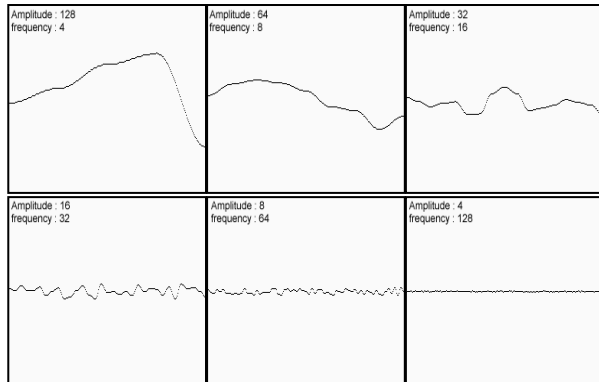
- SPH adaptatives [*Desbrun 98*]
  - Diviser en cas de grande déformation
  - Grouper dans les zones stables



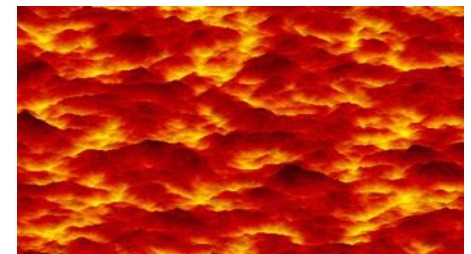
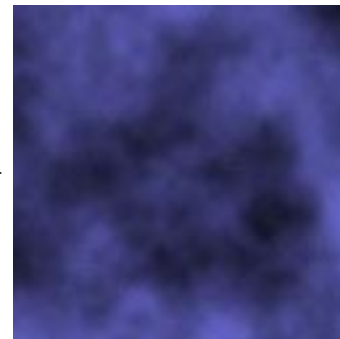
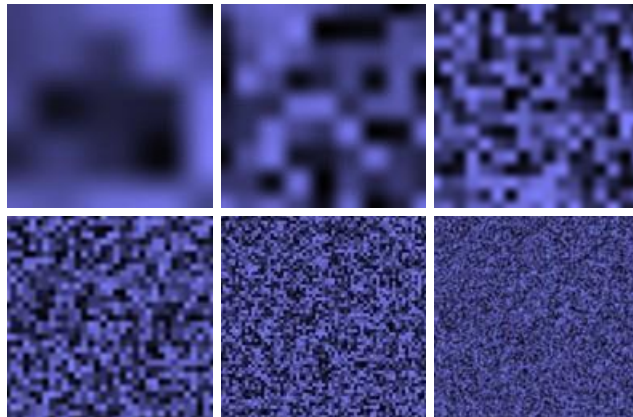
- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

# *Choix de la texture de détails*

- **Bruit fractal [Perlin88]**



$$T(x) = \sum 1/2^i B(2^i x)$$

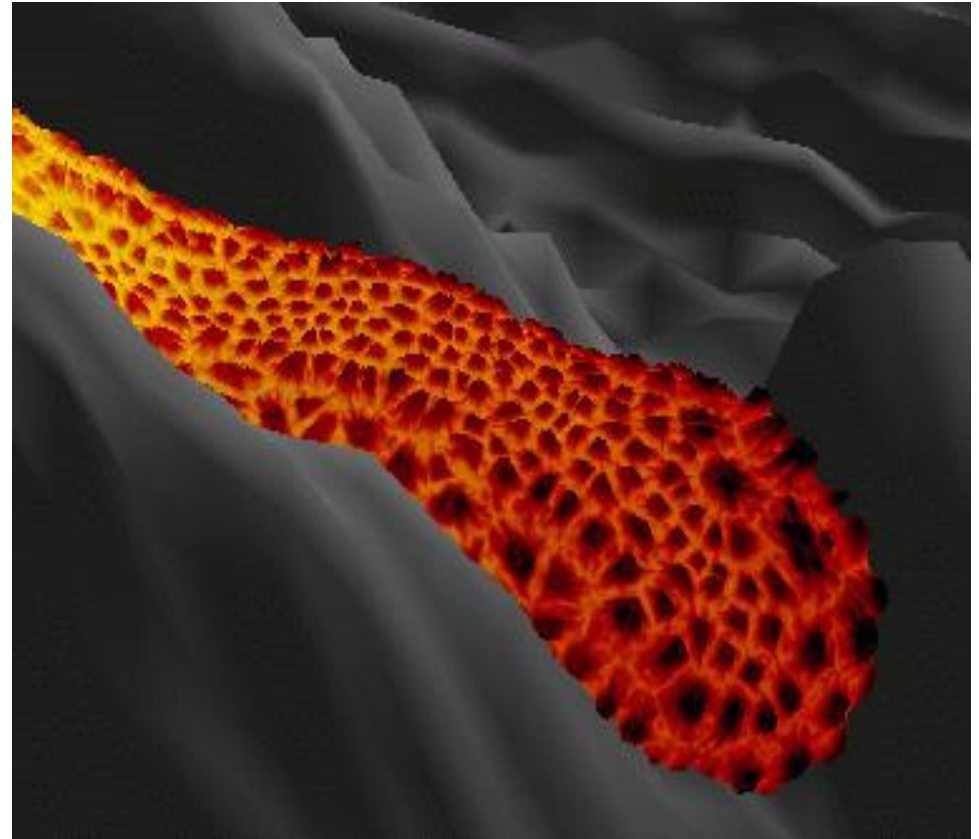
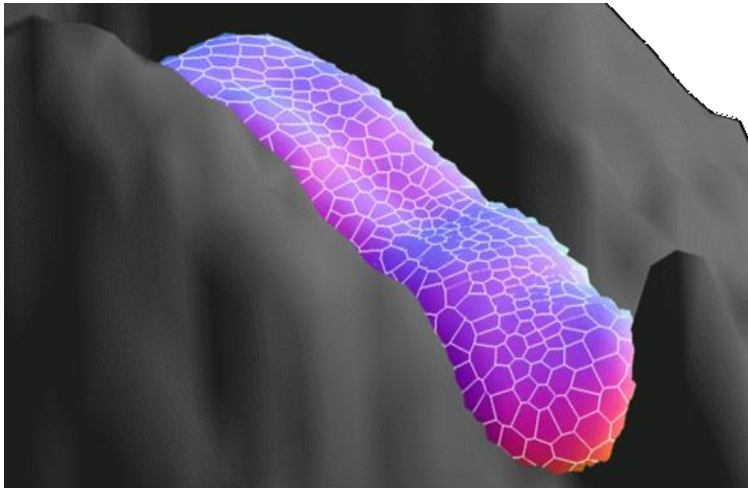


- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

## *Couplage des sous-modèles*

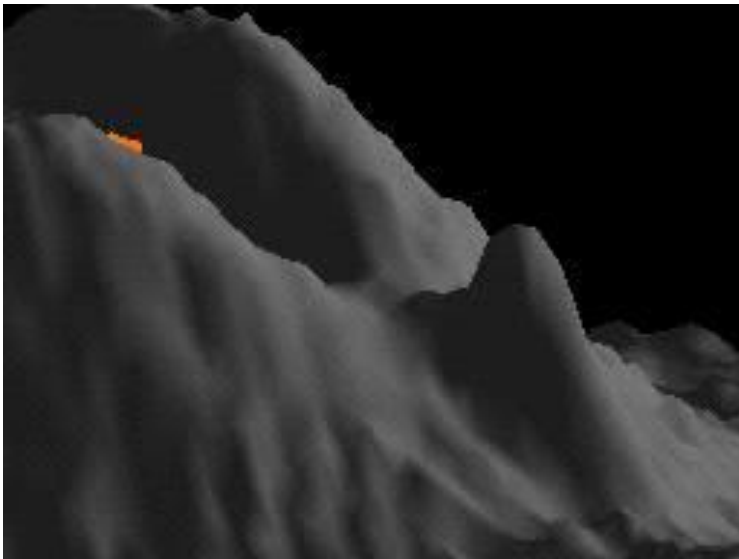
**Détails : animés avec la coulée, aspect fonction température**

- Particules proches surface
  - Portent une « écaille » (région de Voronoi)
  - Texture fonction de  $T(t)$

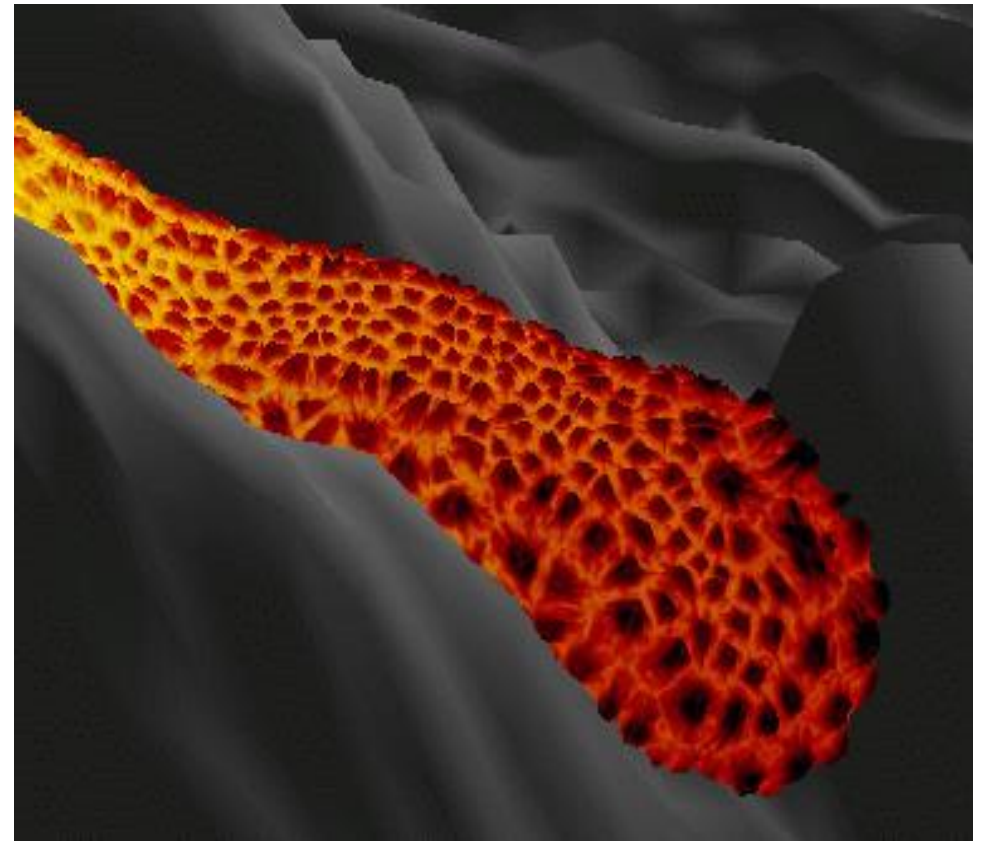


- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Coulée de lave*
- ✓ *Papier froissé*

## *Résultats* [Stora 99]



Première coulée de lave en  
informatique graphique!





- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

## *Exemple 2 : Prairies sous le vent*

- **Objectif de temps réel** (*société Infogrames*)
  - Scène naturelle interactive pour le jeu vidéo
- **Difficultés**
  - Nombre de brins d'herbe
  - Vue d'un marcheur
    - Du proche au lointain
    - La caméra bouge
  - Effets de vent, empruntes

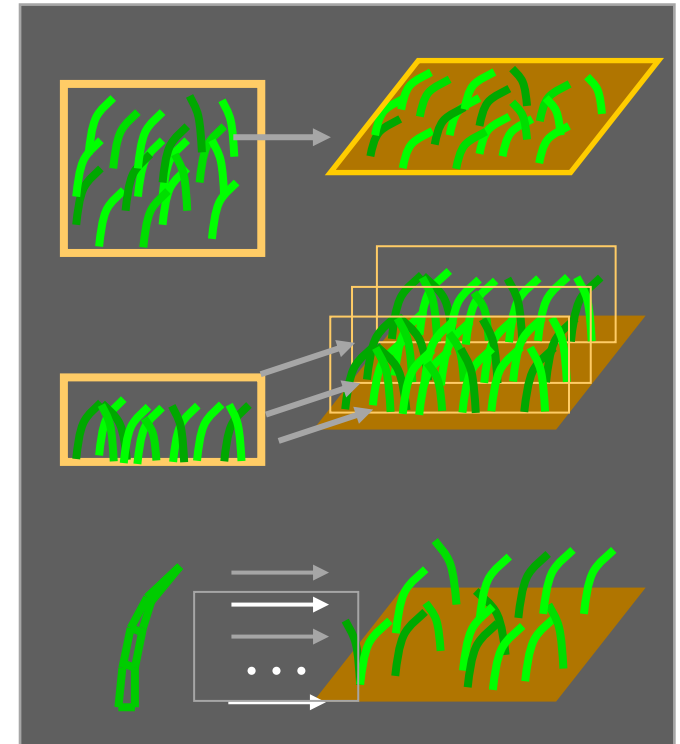
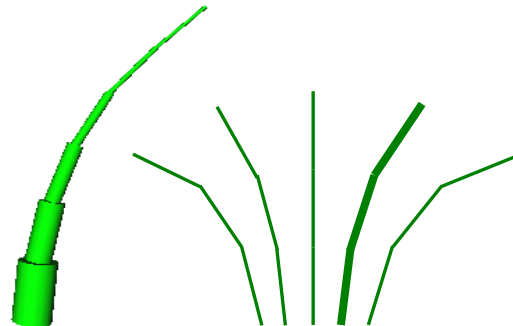
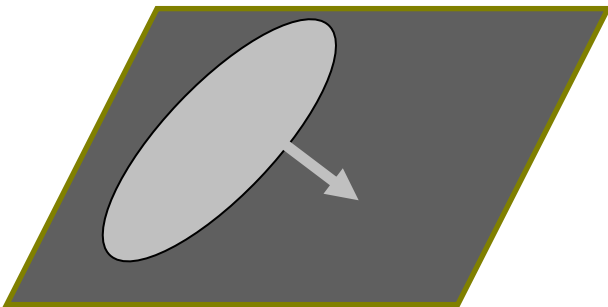


- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - **Prairie**
- ✓ *Papier froissé*

## *Prairies sous le vent*

### Sous-modèles

- Herbe : 3 niveaux de détail
- Vent: masque + action
  - bourrasque, tourbillon, brise
- Receveur : brin d'herbe
  - déformations : pré-simulation



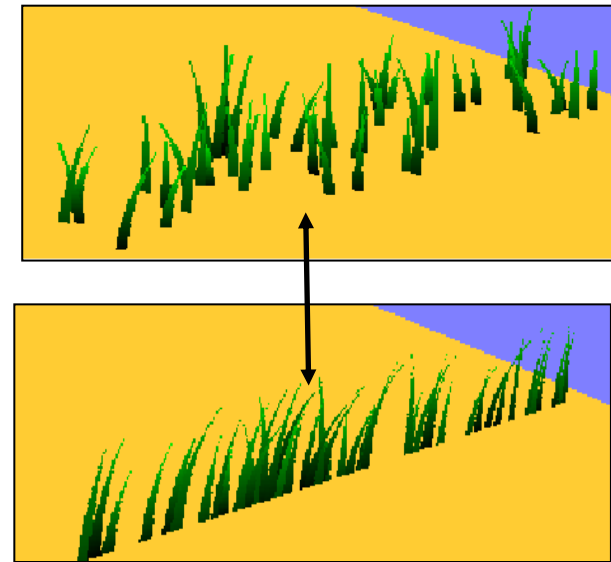
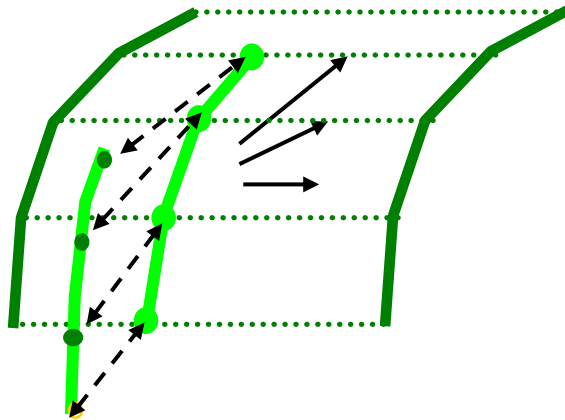
- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Prairie*
- ✓ *Papier froissé*

## *Transitions entre niveaux de détail*

### **Fonction de la distance à la caméra**

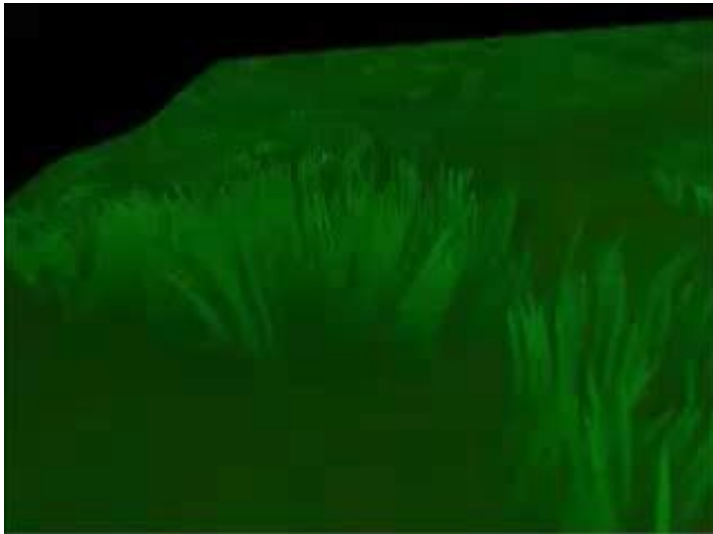
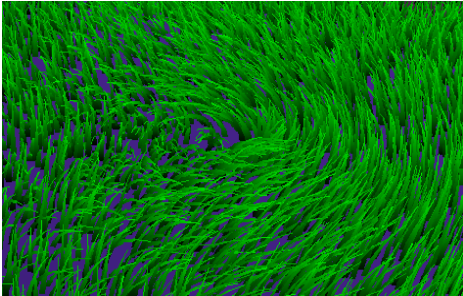
- Brins d'herbe 3D  $\leftrightarrow$  Texture 2D 1/2
- Texture 2D 1/2  $\leftrightarrow$  Texture plane

### **Invisibles pendant le mouvement!**



- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - ***Prairie***
- ✓ *Papier froissé*

## ***Résultats*** [Perbet 2002]



- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Prairie*
- ✓ *Papier froissé*

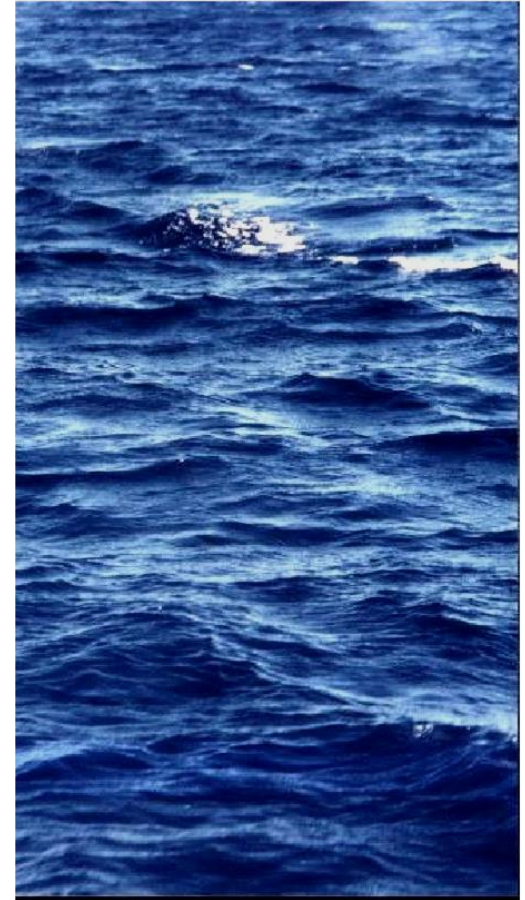
## *Exemple 3 : Océan virtuel*

### **Buts**

- Compromis réglable réalisme/ efficacité
- Mouvement de caméra
- Océan non borné

### **Difficultés**

- Déformations complexes
- Vu du proche au lointain
- Problèmes de crénelage (*aliasing*)

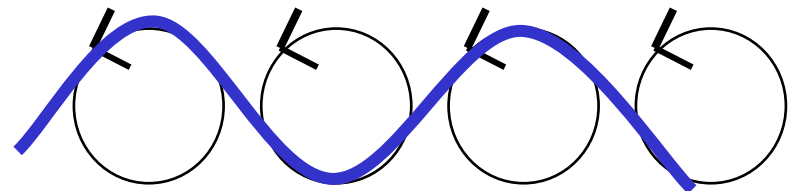
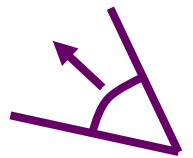
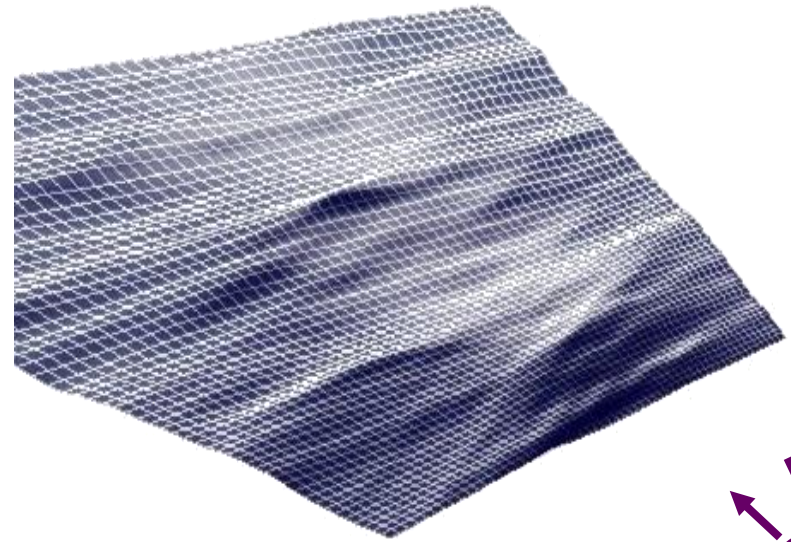


- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Océan*
- ✓ *Papier froissé*

## *Océan virtuel*

### Sous-modèles

- Receveur
  - Maillage
  - Projection des pixels de l'écran!
- Trains de vagues
  - Masque + action



- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - *Océan*
- ✓ *Papier froissé*

## *Océan virtuel : Animation adaptative*

### **Tenir compte du niveau de détail possible**

- Filtrer les trains de vague en fonction de la distance
- Réduit le temps de calcul et évite les effets de crénelage



- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
  - **Océan**
- ✓ *Papier froissé*

## **Résultats** [Hinsinger 2002]





- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

## *2015 - Méthodologie toujours d'actualité!*

### **Papier froissé**

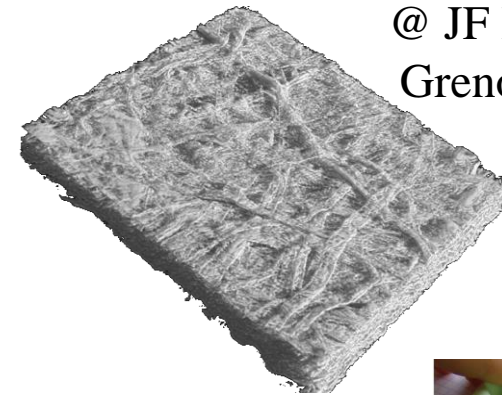
Objet courant – phénomène naturel

#### **Niveau microscopique ( $1\mu\text{m}$ )**

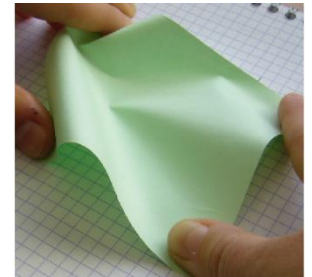
- Fibres entrelacées
- Eventuellement différentes couches

#### **Niveau macroscopique**

- Surface développable inextensible et incompressible
- Plasticité due à la fracture des fibres (singularités, plis)



@ JF Bloch  
Grenoble-INP



- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

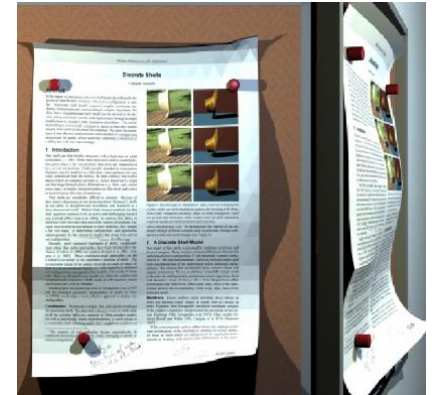
## *Méthodes précédentes en informatique graphique*

### **Simulation par modèle physique**

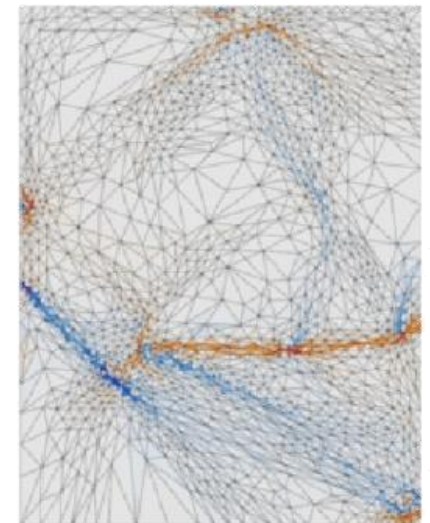
plis selon les arêtes du maillage !

- Plaque mince, maillage selon des plis prédéfinis
- Éléments fins, maillage adaptatif
  - Éléments inextensibles
  - Réaliste si beaucoup d'éléments
  - Plusieurs heures de calcul !

[Grinspun2003  
@Eurographics]



[Narain 2013 @ACM]



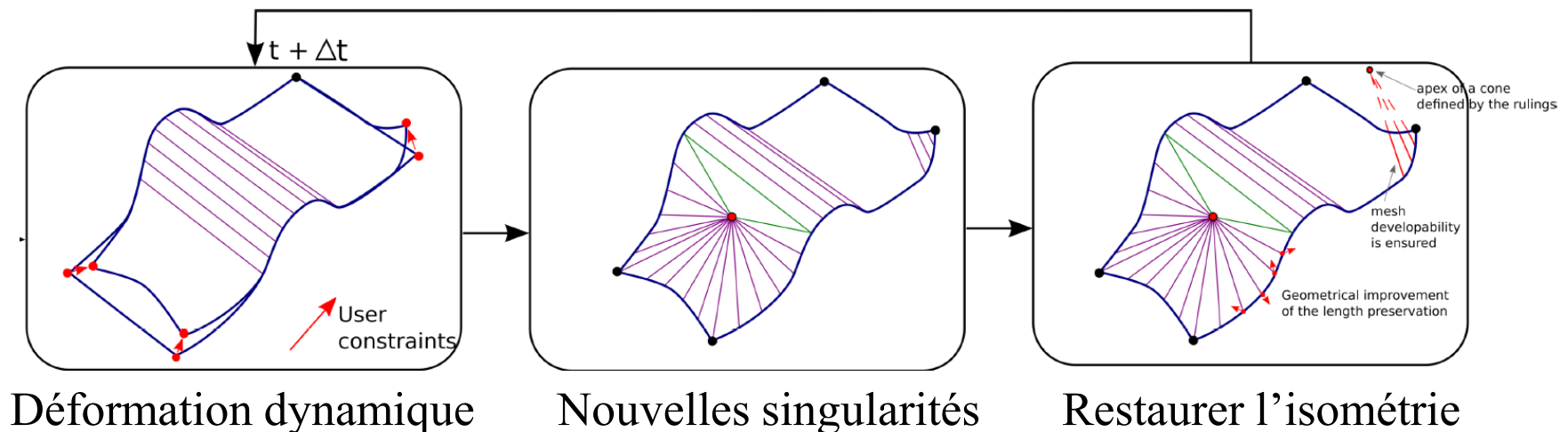
*Peut-on froisser du papier interactivement?*

- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

## *Sous phénomènes ?*

1. Déformations dynamiques (matériau flexible)
2. Apparition de singularités persistantes (plasticité)
3. Surface développable, inextensible

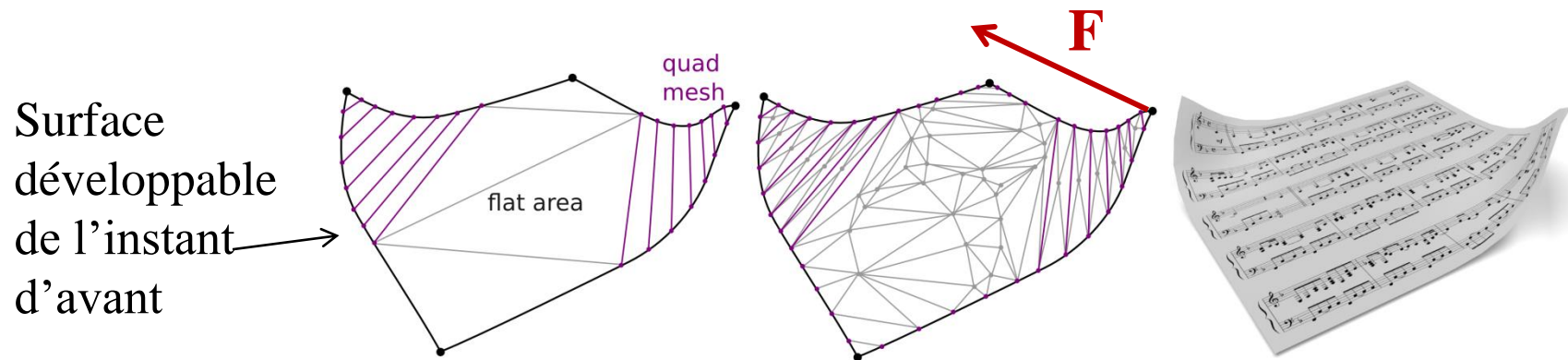
**Notre méthode** : trois sous-modèles activés tour à tour



- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

# 1. Déformation dynamique

- Mailler aléatoirement les zones planes
  - Ne privilégie aucune direction !
- Simulation par éléments finis classique



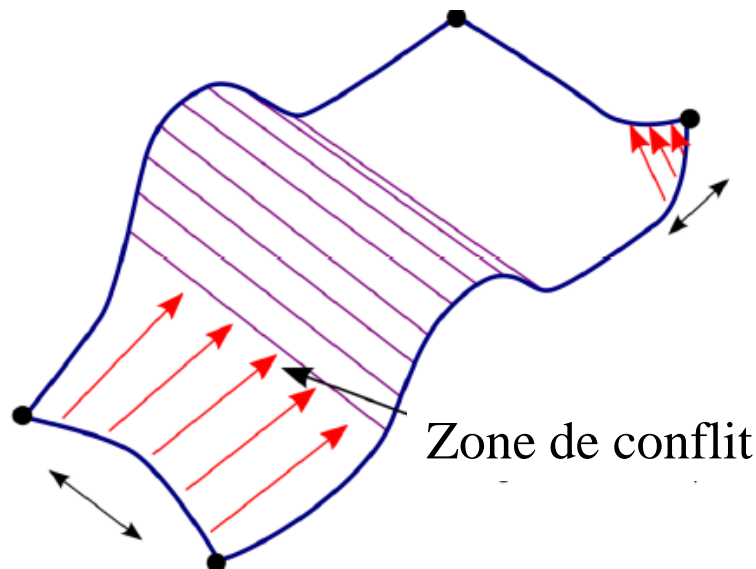
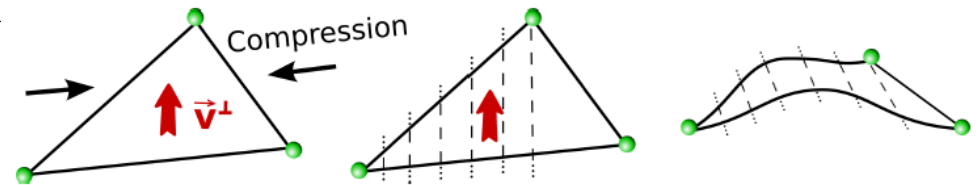
Le résultat peut ne plus être développable ni isométrique...

- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

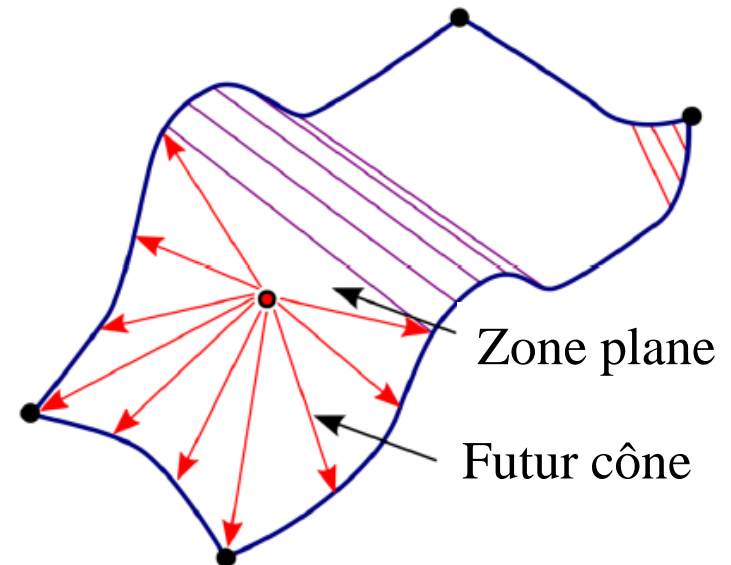
## 2. Courber le papier et le froisser

### Connaissances surface développable : courbure Gaussienne nulle

- Mesurer la direction de compression maximale des triangles
- Remailler selon les « règles »
- Propager sur une région



Créer  
singularité  
→

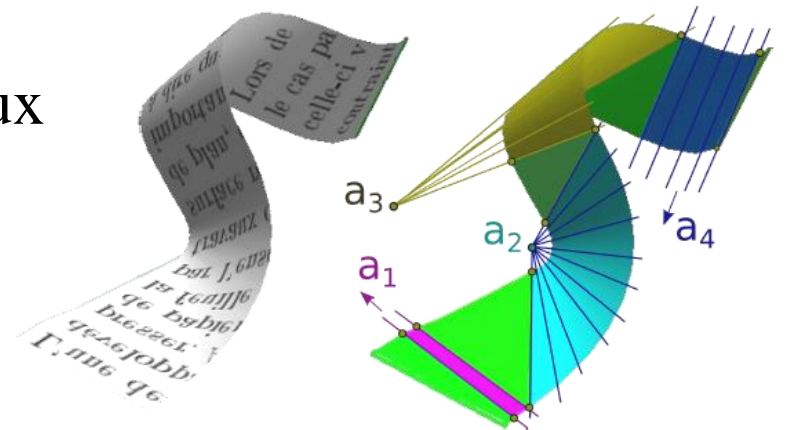


- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

# *Restaurer développabilité et isométrie*

## Restaurer la développabilité

- Mise à jour des jonctions entre parties courbes et planes
- Régions courbes, sans point singulier
  - approximation conique par morceaux  
(modèle de *Blaschke*, 1885-1962)



## Restaurer l'isométrie au patron

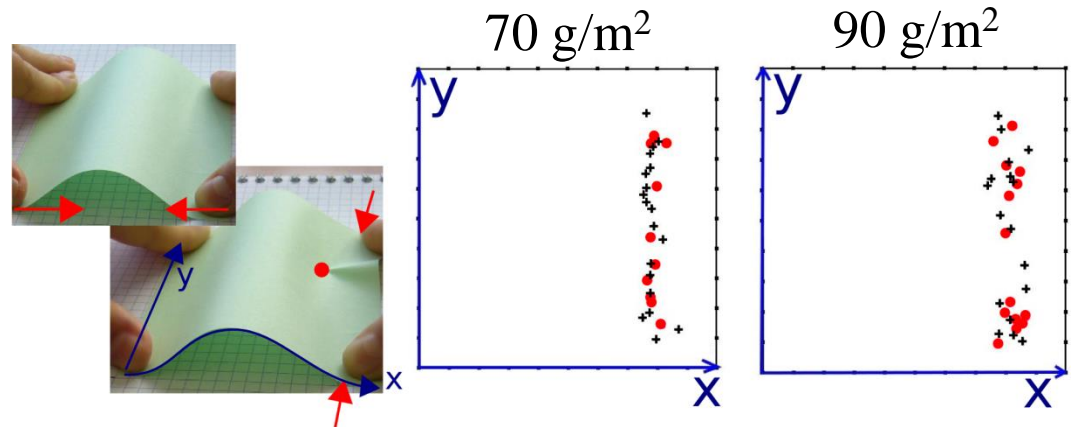
- Optimisation pour restaurer la longueurs des arêtes

- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

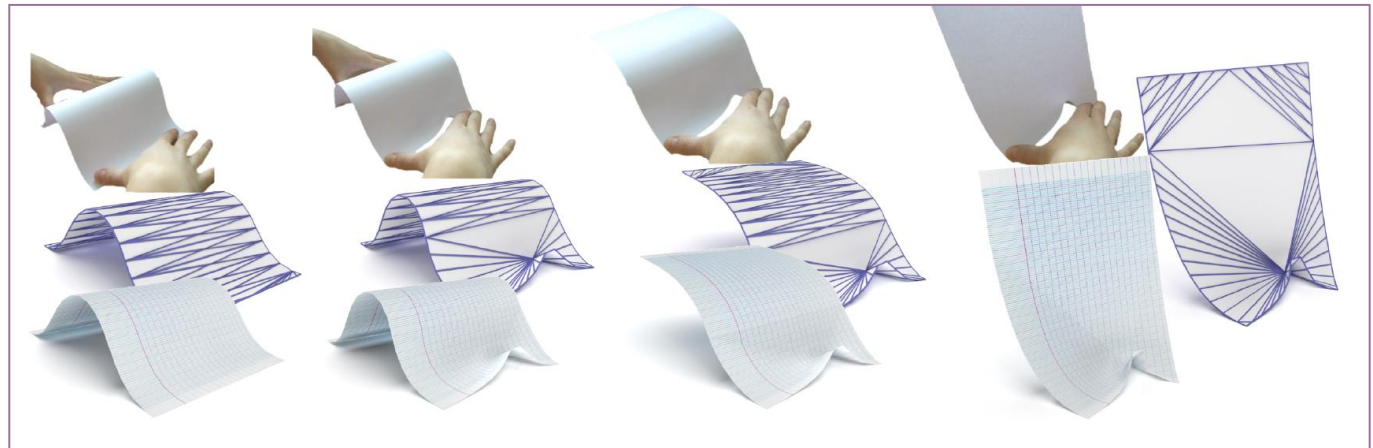
## *Résultats et validation* [Scheck 2015]

### Validation statistique

- Position 1<sup>ère</sup> fracture
- + mesures réelles
- Notre simulation

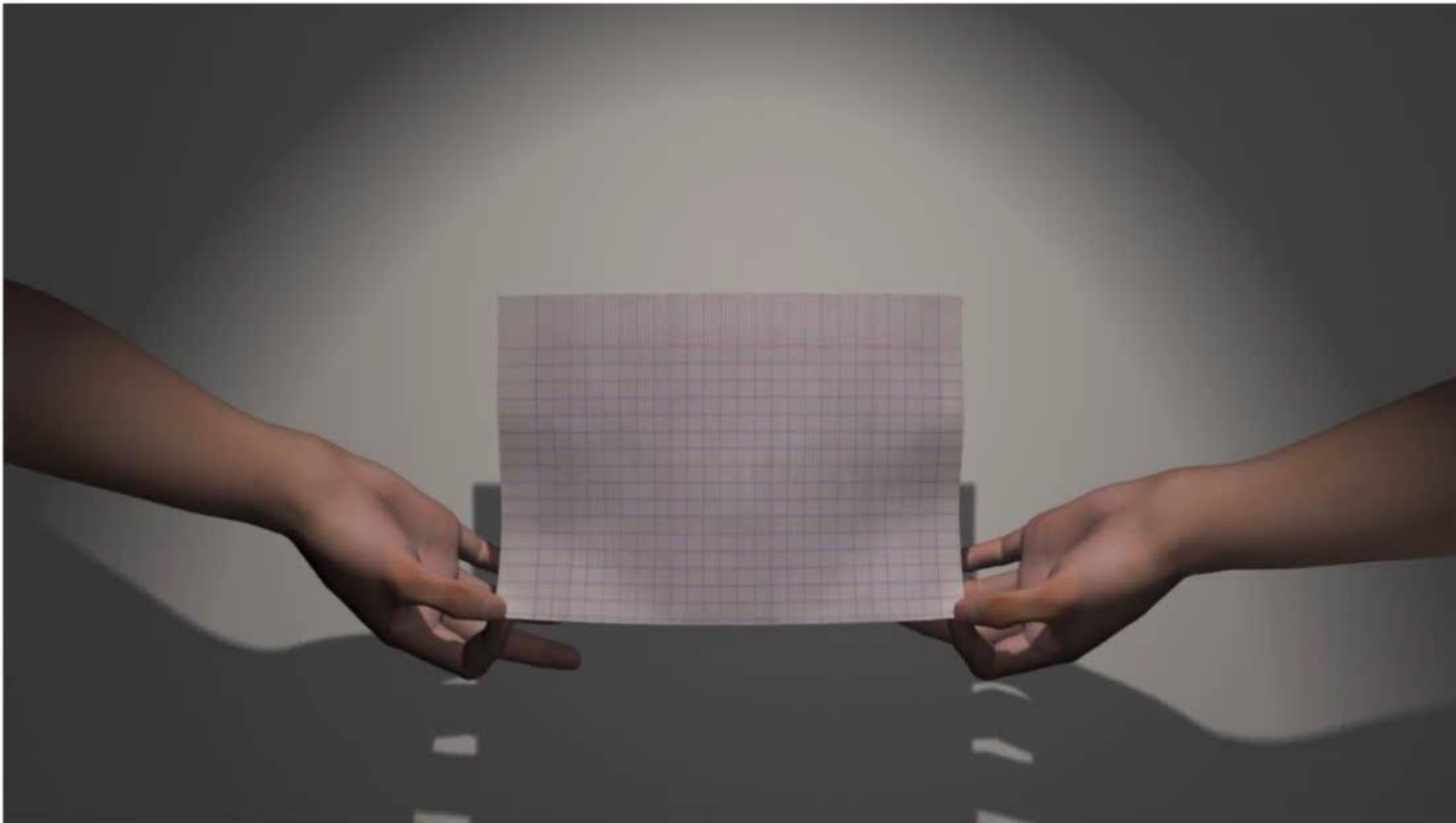


### Validation perceptuelle



- ✓ *Méthodologie*
- ✓ *Application aux scènes naturelles*
- ✓ *Papier froissé*

## *Résultats et validation* [Scheck 2015]





# *Conclusion*



## **Simulation graphique des phénomènes naturels**

- Méthodologie spécifique : réalisme visuel – efficacité – contrôle
  - Hiérarchies de modèles minimaux, couplés
  - Inventer des algorithmes multi-échelle, adaptatifs, hiérarchiques
  - Validation : perception humaine et mesures statistiques
- Mondes virtuels qui prennent vie lorsqu'on les explore
- Apport des collaborations interdisciplinaires

**Séminaire :** *Simulation physique pour les mondes virtuels.* François Faure

# *Bibliographie*

- DeBunne, Desbrun, Cani, Barr (2001). Dynamic Real-Time Deformations using Space and Time Adaptive Sampling. ACM SIGGRAPH.
- Desbrun, Cani (1997). Animation of Deformable Models Using Implicit Surfaces. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics vol3.
- Grinspun, Hirani, Desbrun, Schröder (2003) Discrete Shells. SCA'03. Eurographics.
- Hinsinger, Neyret, Cani (2002). Interactive Animation of Ocean Waves. *ACM-EG Symposium on Computer Animation* .
- Narain, Pfaff, O'Brien (2013). Folding and crumpling adaptive sheets. ACM Trans. Graph. (Proc. of SIGGRAPH) 32, 4.
- Perbet, Cani (2001) Animating Prairies in Real-Time. *ACM I3D*.
- Perbet, Raulo, Faure, Cani (2003). A Procedural Approach to Animate Interactive Natural Sceneries, *CASA 03*.
- Shreck, Rohmer, Hahmann, Cani, Jin, Wang, Bloch (2015). Non-smooth developable geometry for interactively animating paper crumpling. ACM TOG. To appear.
- Stora Agliati Cani Neyret (1999). Animating Lava Flows. *Graphics Interface*.