

# Mousses et coquilles

## (morphologies de structures)

Soutenance d'habilitation à diriger des recherches, 11 juin 2008

Catherine Quilliet

### **Jury:**

Rita C. de Almeida (UFRGS, Porto Alegre)

Jean-Marc di Meglio (MSC, Paris)

François Graner (Spectro, Grenoble)

Ludovic Pauchard (FAST, Orsay)

Brigitte Pépin-Donat (SPrAM, Grenoble)

# **Mousses et coquilles**

## **(morphologies de structures)**

- Propriétés géométrico-topologiques de mousses
- Déformation de coquilles

- Propriétés géométrico-topologiques de mousses
- Déformation de coquilles

- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

Introduction: pourquoi la topologie ?

Système étudié

Désordres et cisaillement

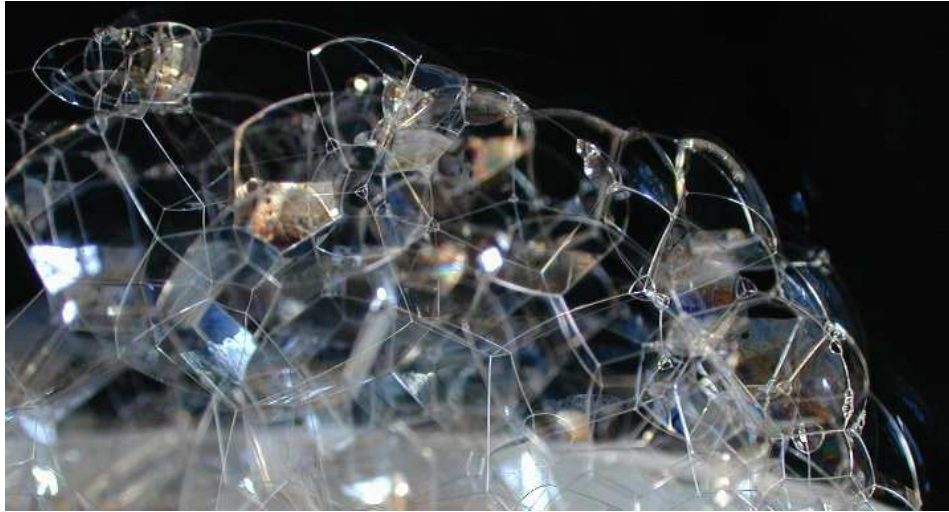
Voir l'histoire d'une mousse ?

Conclusion, perspectives

- Déformation de coquilles

# Mousses - Introduction

De l'eau, de l'air, du tensioactif:



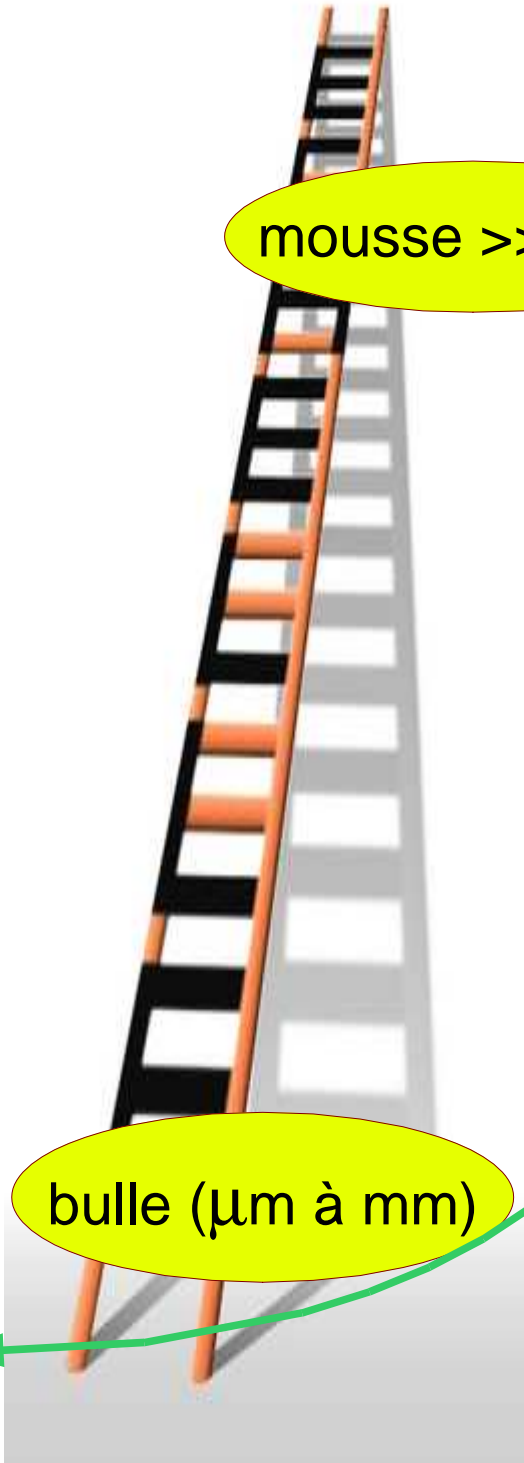
Comment une mousse se déforme/s'écoule-t-elle ?  
(rhéologie)

Visco-élasto-plasticité: description unifiée ?

permanents: F. Graner, P. Marmottant, C. Q.

(ex-)doctorants: B. Dollet, C. Raufaste, S. Ataei Talebi, I. Cheddadi

+ collaborations, étudiants ...



mousse >> bulle

bulle ( $\mu\text{m}$  à  $\text{mm}$ )

géométrie: contrôle, mesure

réarrangements irréversibles (topologie)

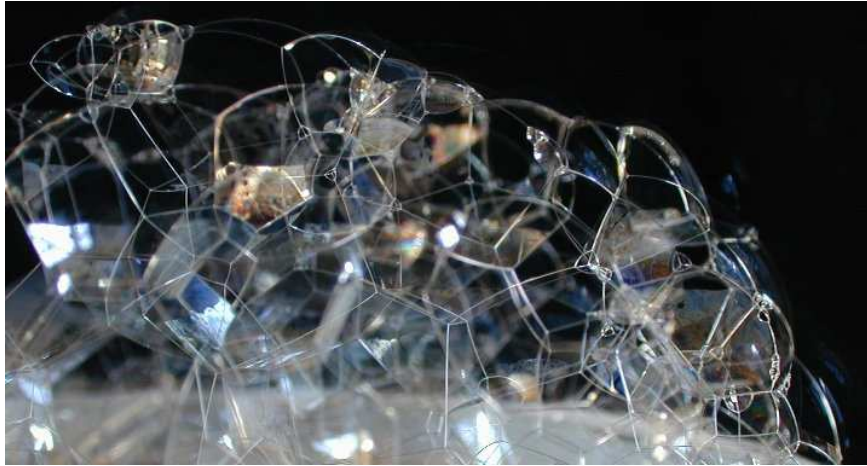
Description continue

$\supset$  plasticité (histoire !)



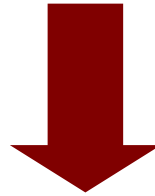
Paramètres microscopiques

élasto-plastique  
+  
quasistatique



Comment ~~une~~ mousse se déforme/s'écoule-t-elle ?

CETTE



Outils:  
description d'une mousse  
géométrie + topologie  
à l'échelle des bulles ?

Question:  
peut-on voir l'histoire  
d'une mousse ?

- Survol
- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

Introduction: pourquoi la topologie ?

**Systeme étudié**

Désordres et cisaillement

Voir l'histoire d'une mousse ?

Conclusion, perspectives

- Coquilles



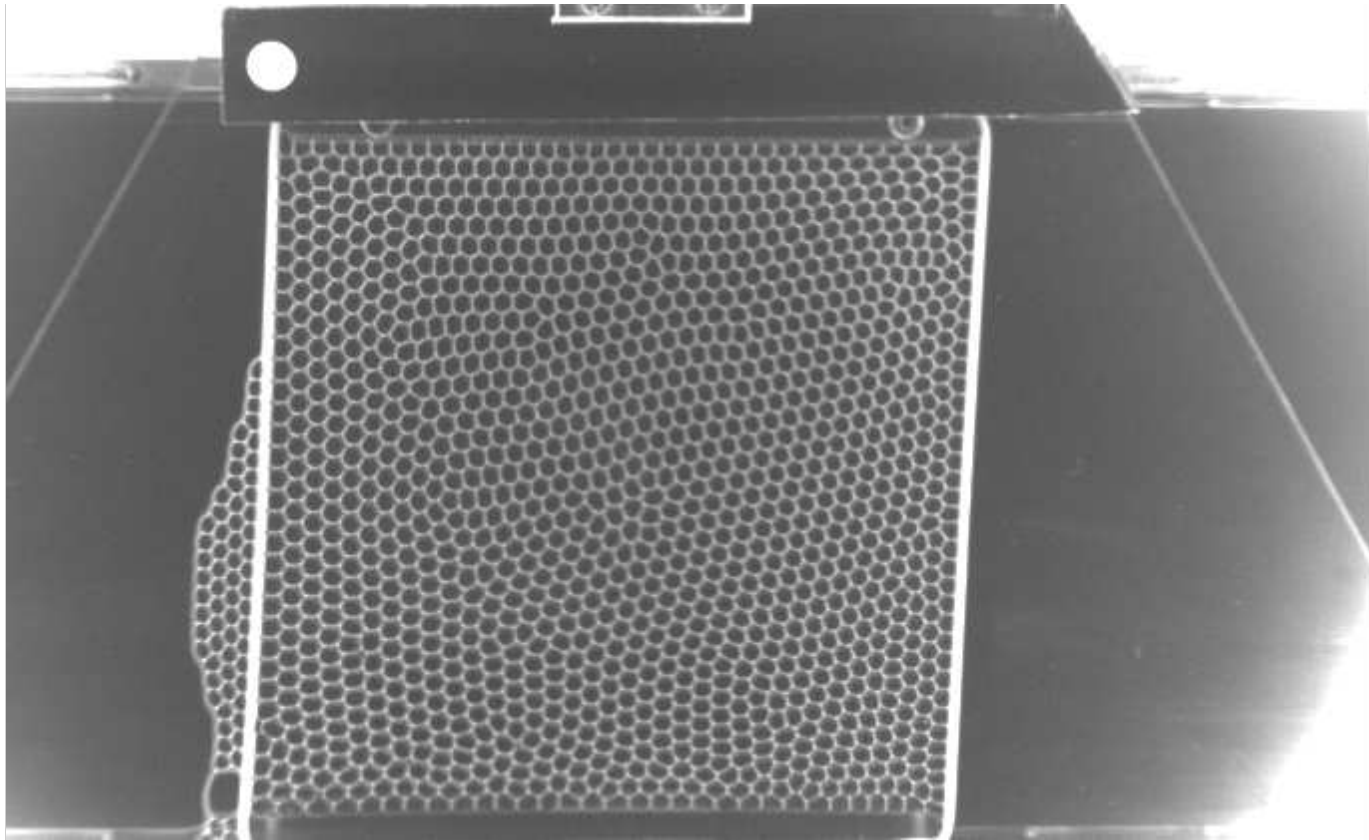
Dispositif expérimental:



mousses bidimensionnelles

## Dispositif expérimental: cisaillement de mousses bidimensionnelles

- cisaillement simple, uniforme
- système fermé: distribution en taille des bulles constante pendant cisaillement

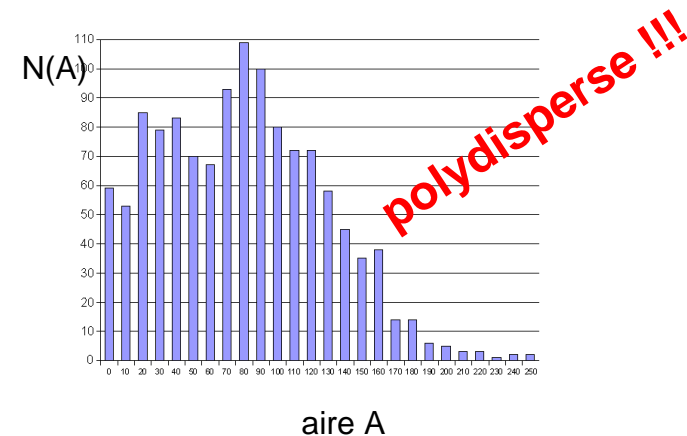
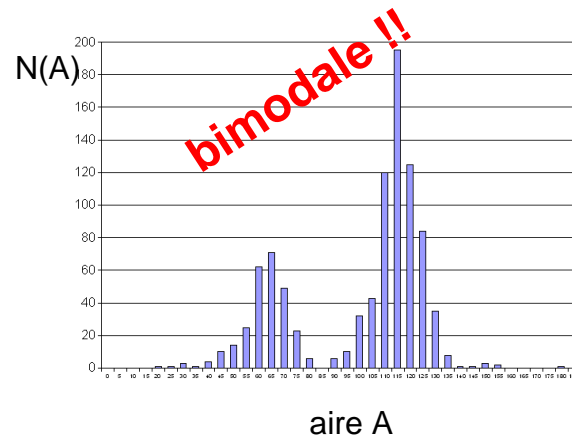
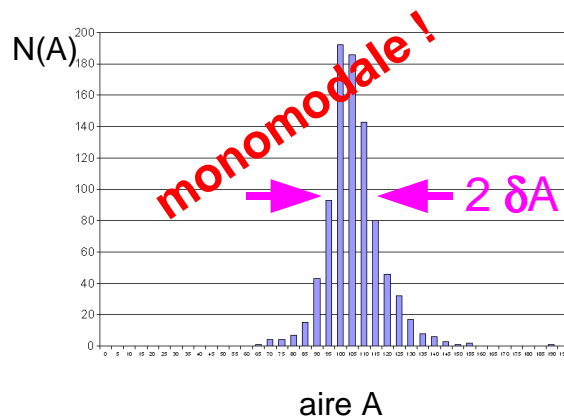


+ acquisition et traitement d'image, extraction données géométriques et topologiques.

# Paramètres « microscopiques »:

## - Géométriques:

- taille des bulles:  $\langle A \rangle$
- distribution en taille des bulles ?  
différentes morphologies envisageables:



pour quantifier: écart-type adimensionné:  $\delta A/A = ET(A)/\langle A \rangle$   
(« désordre géométrique »)

réducteur mais suffisant ...

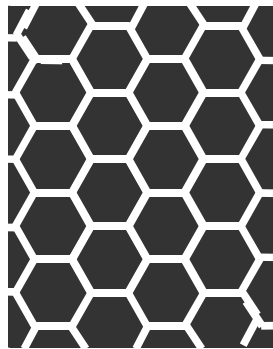
## - Topologiques:

décrire l'organisation des bulles ?

distribution des nombres de côtés  $P(n)$  !

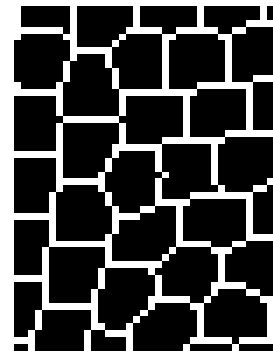
« désordre topologique »  $\delta n/n = ET(n) / \langle n \rangle$

~6



$n=6$  voisins partout

$$\delta n/n = 0$$



$n=5, 6$  ou  $7$

$$\delta n/n > 0$$

Rôle du cisaillement sur le désordre topologique ?

- Survol
- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

Introduction: pourquoi la topologie ?

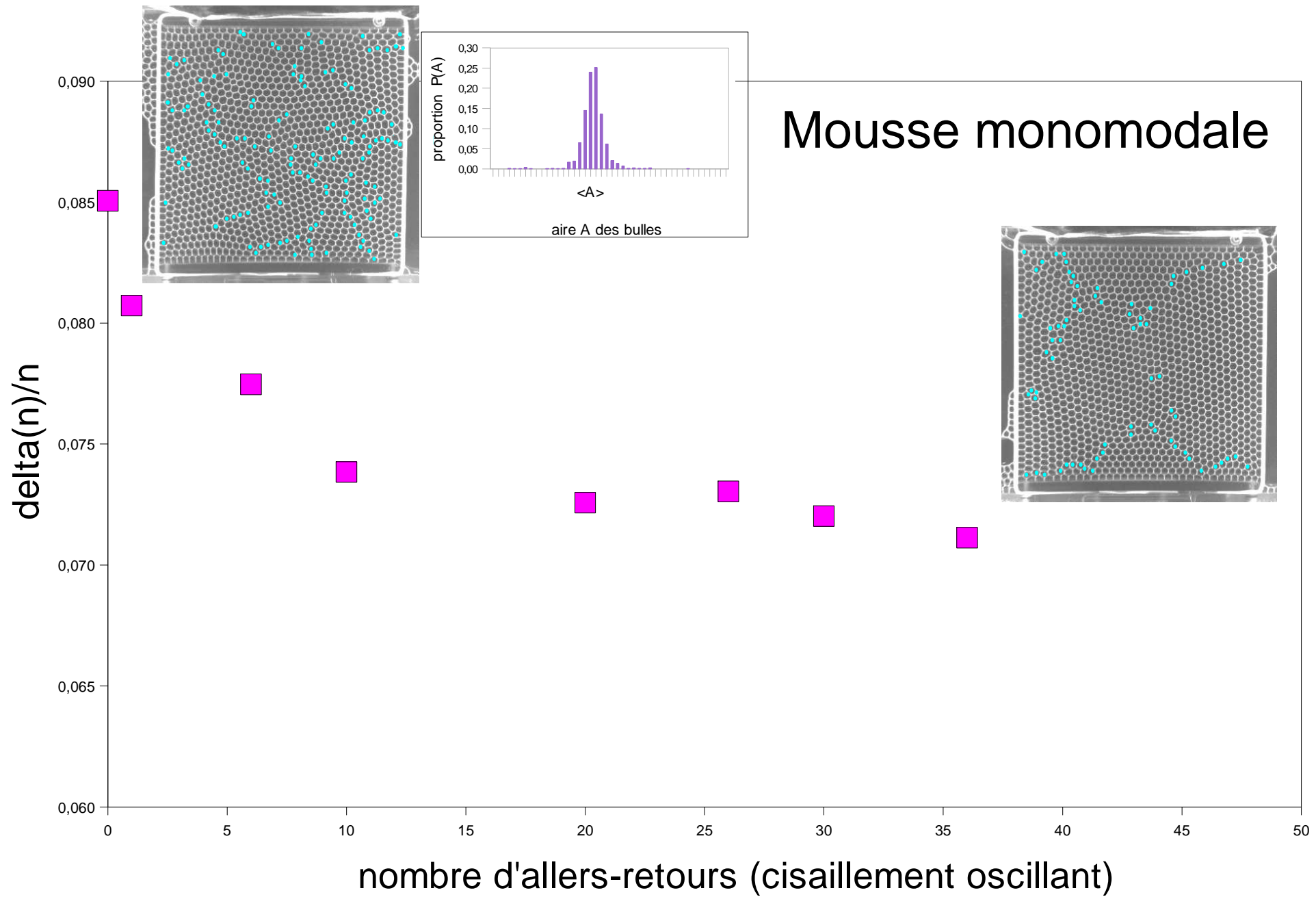
Système étudié

Désordres et cisaillement

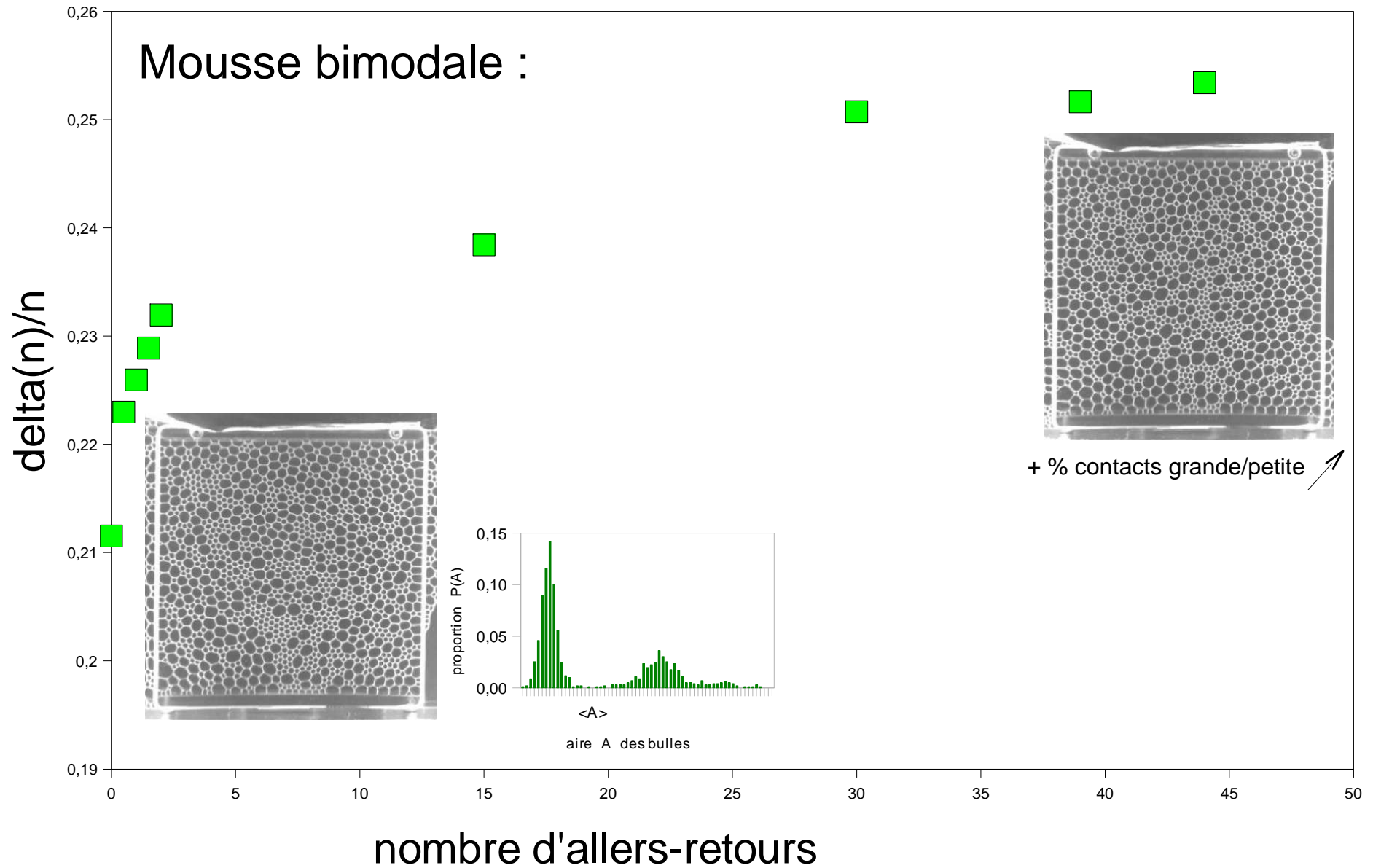
Voir l'histoire d'une mousse ?

Conclusion, perspectives

- Coquilles

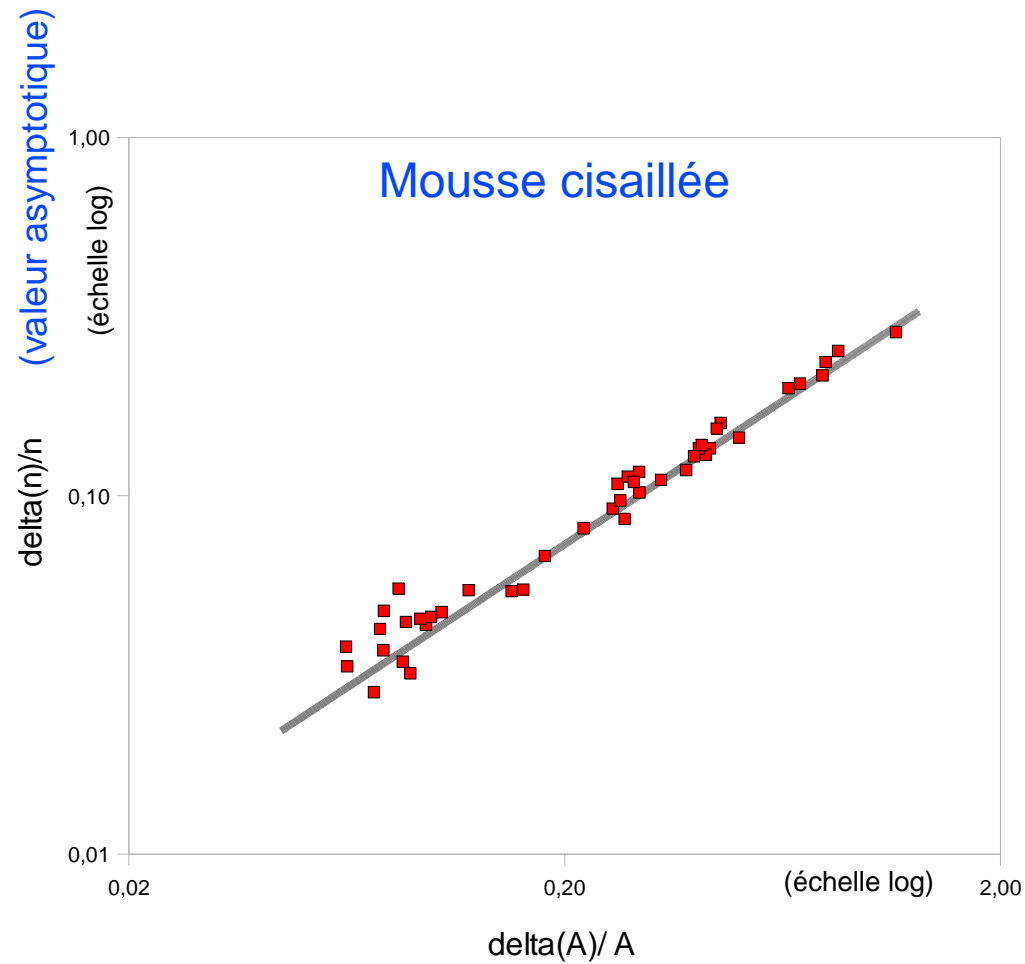


**Le cisaillement ordonne les mousses monodisperses.**



**Le cisaillement mélange les mousses bimodales.**

## Désordre topologique vs désordre géométrique :



S. Riondet  
D. Rabaud  
S. Ataei Talebi

« Courbe des désordres »:  $\delta n/n = 0.27 (\delta A/A)^{0.8}$



## Courbe des désordres: conséquences

- Mousse cisailée:  ~~$\delta n/n$~~
- État macroscopique reproductible (préparation)
- Critère de "secouage" (simulations, structures bio)
- Modèle théorique ?

- Survol
- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

Introduction: pourquoi la topologie ?

Système étudié

Désordres et cisaillement

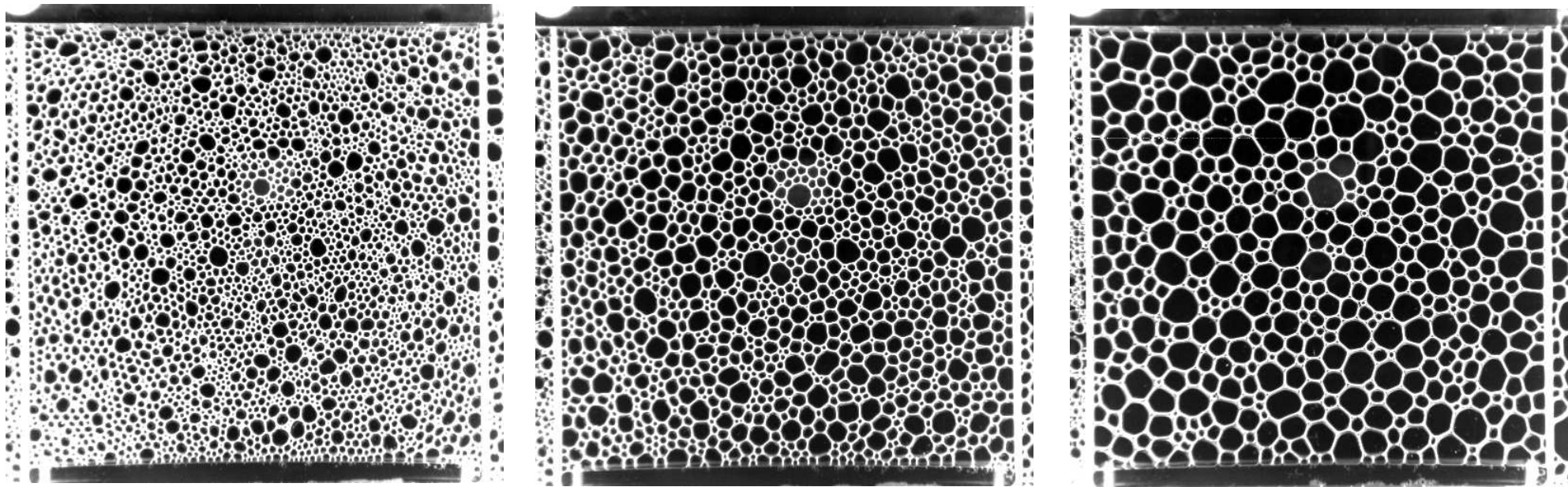
Voir l'histoire d'une mousse ?

Conclusion, perspectives

- Coquilles

Brute/cisaillée: peut-on lire d'autres histoires sur la photographie d'une mousse ?

## Mousses mûries:

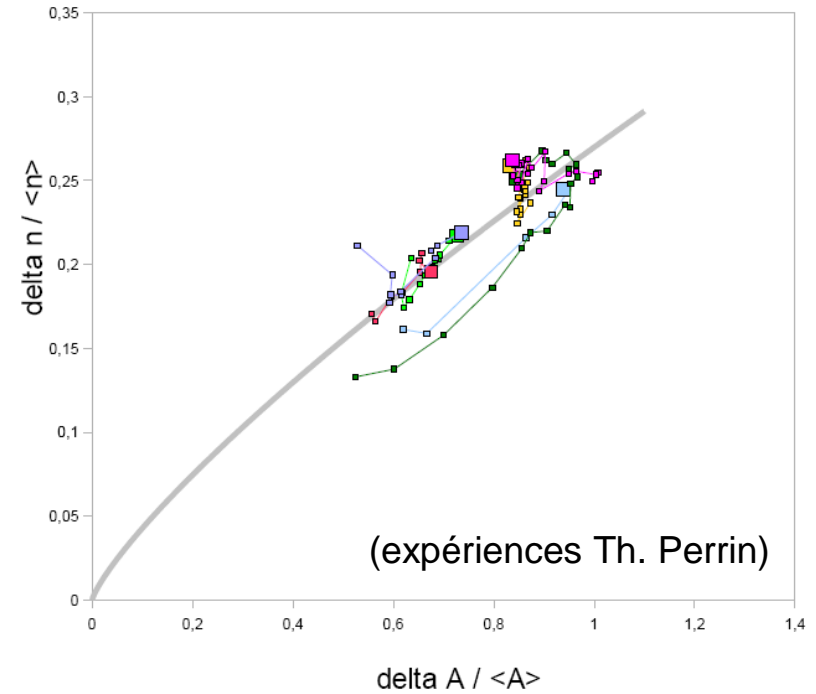
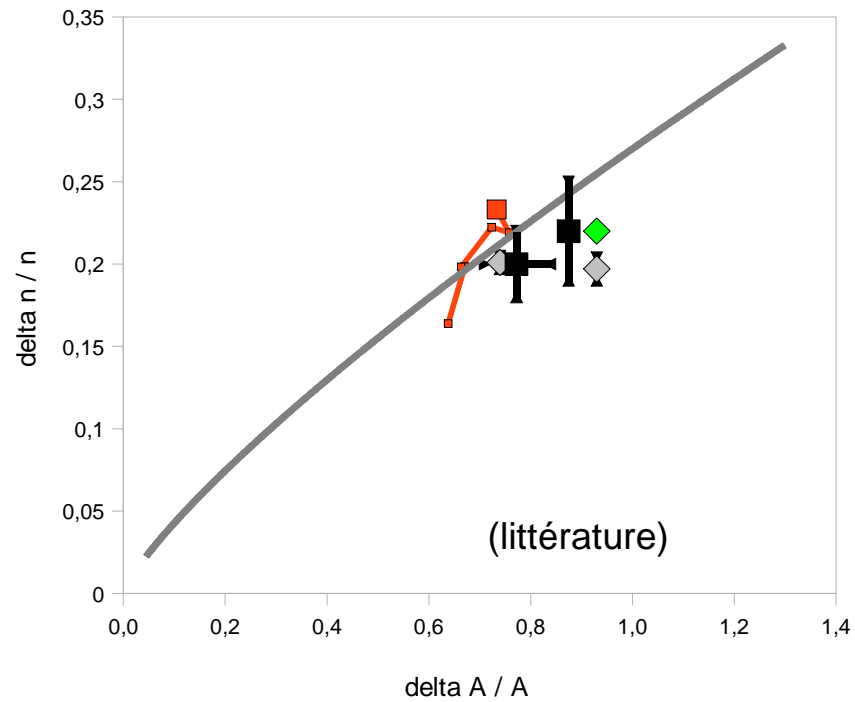


heures, jours

(régime invariant d'échelle)

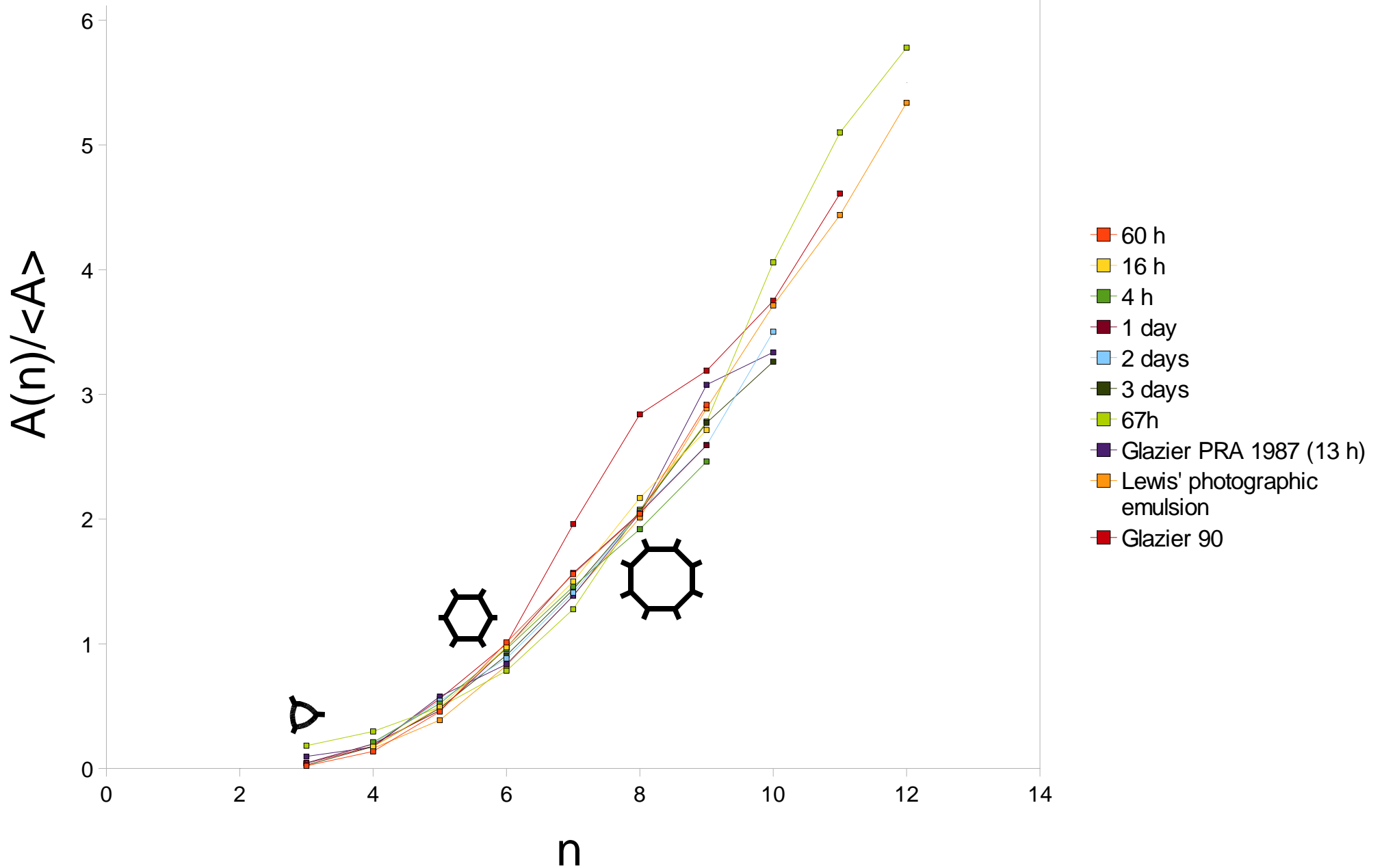


## Régime invariant d'échelle: $\delta n/n$ , $\delta A/A$ ?



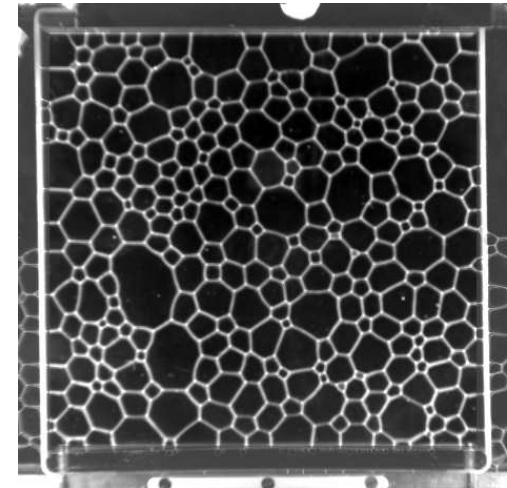
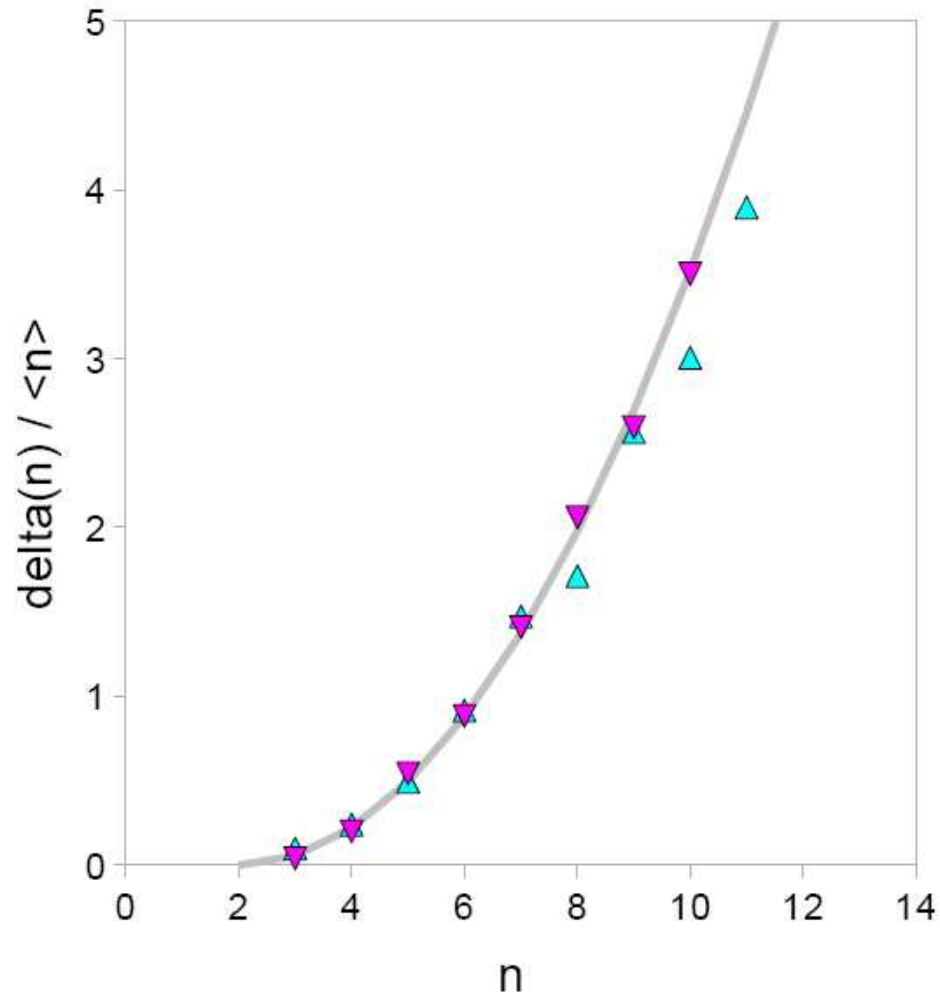
Dispersion des points:  
seconds moments trop sensibles aux cut-off des distributions larges ?

Représentation de Lewis adimensionnée:  
 (  $A(n)$ : aire moyenne des bulles à  $n$  côtés )

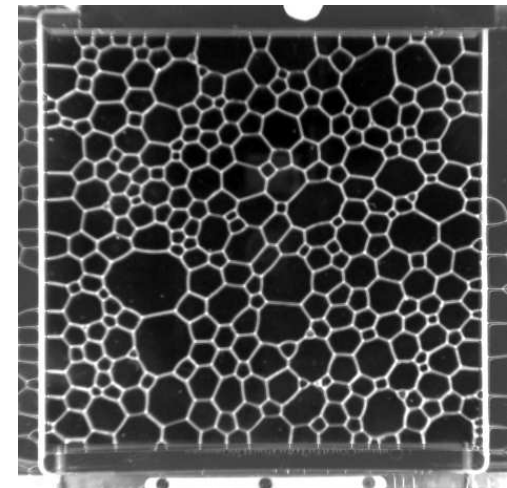




Expériences combinant mûrissement et cisaillement:

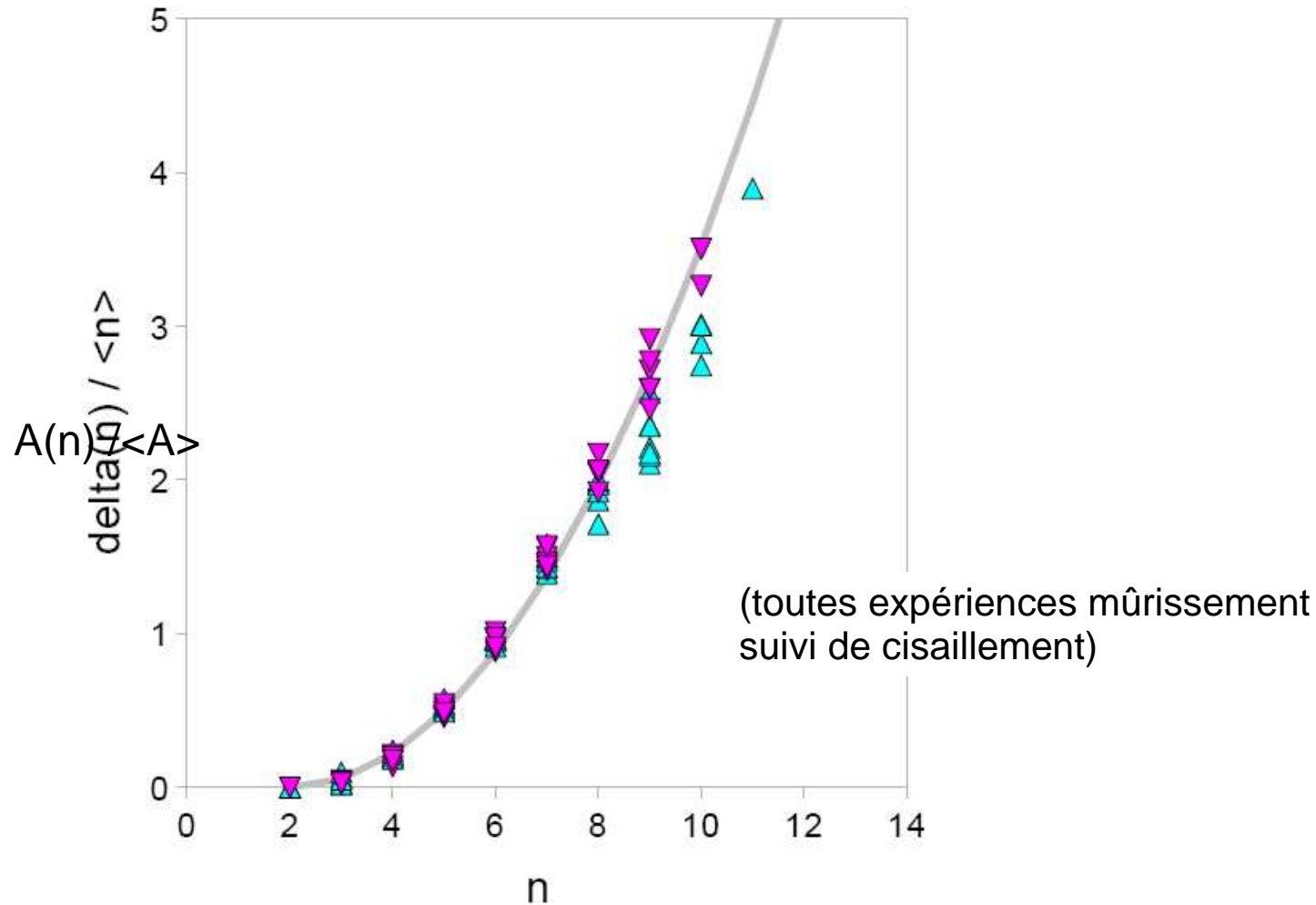


mousse mûrie 2 jours



+ 20 AR de cisaillement

Expériences combinant mûrissement et cisaillement:



Représentation de Lewis distingue mousse mûrie / cisailée:  
on peut lire l'histoire d'une mousse sur une photo !



- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

Introduction: pourquoi la topologie ?

Système étudié

Désordres et cisaillement

Voir l'histoire d'une mousse ?

Conclusion, perspectives

- Déformation de coquilles

## Conclusion

- Diagramme des désordres: universalité de comportement des mousses cisillées.
- Vécu d'une mousse trahi par sa géométrico-topologie

## Perspectives mousses

- Courbe des désordres: raison théorique ?
- Courbe des désordres en 3D ? (désordre topologique  $\delta F/F \sim$  non accessible, mais désordre géométrique  $\delta V/V$  contrôlable/mesurable à la formation)
- Une mousse mûrie « secouée » change d'organisation: corrélations ?
- Peut-on raconter d'autres histoires ?
- Prévoir l'avenir: incidence sur la rhéologie ?

S. Ataei Talebi:

réponse élasto-plastique  $\leftrightarrow$  propriétés topologiques

- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

- **Déformation de coquilles**

  - Flambage en solution

  - Formes de flambage

  - Conclusion, perspectives



- Soft Matter Group, univ. Utrecht,  
(prof. A. van Blaaderen)

avec Carmen Zoldesi, Arnout Imhof



- depuis sept. 2005: Spectro, Grenoble

- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

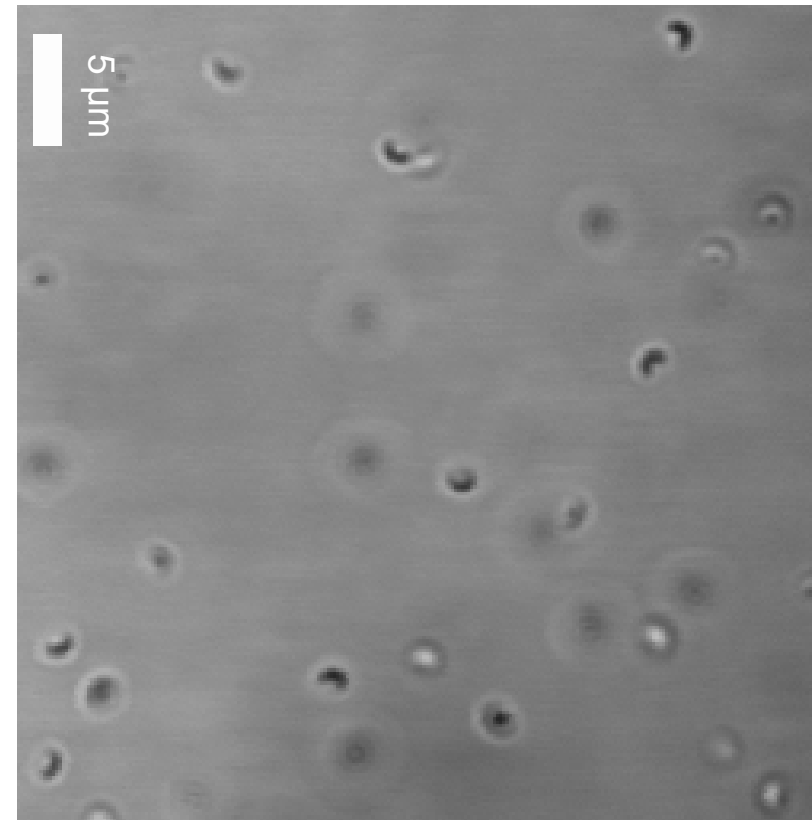
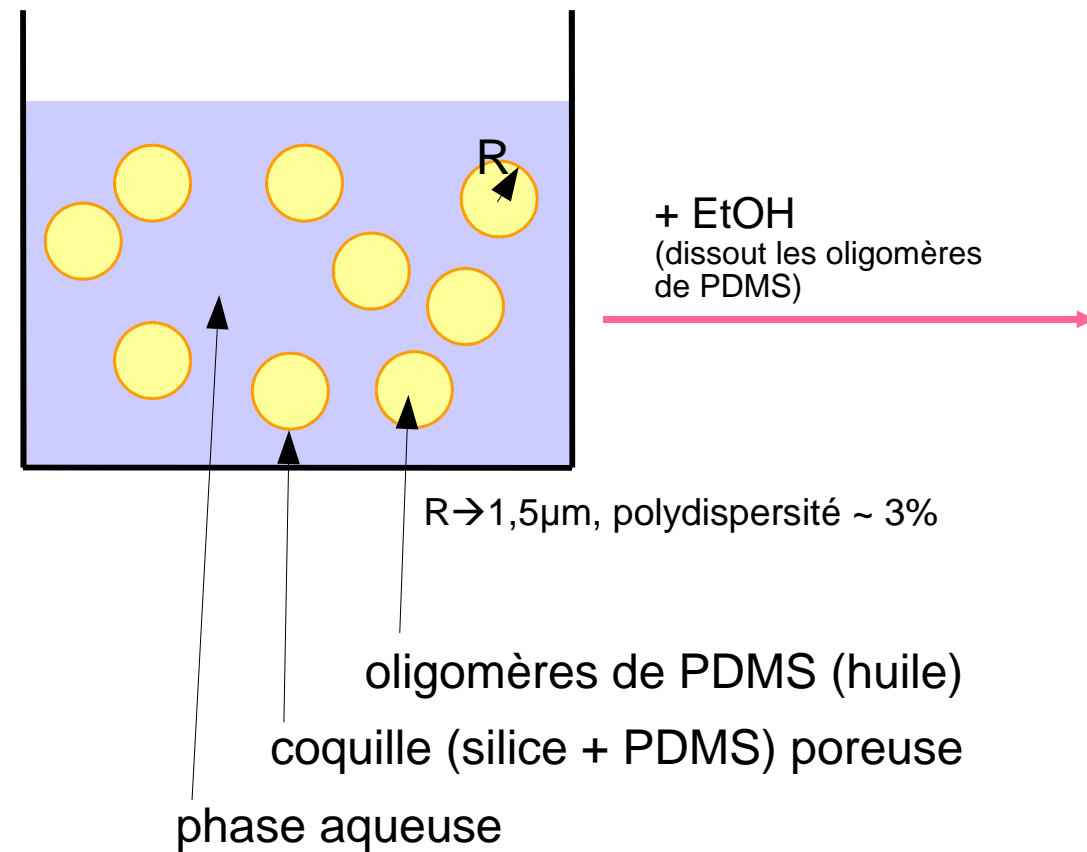
- Déformation de coquilles

  - Flambage en solution

    - Formes de flambage

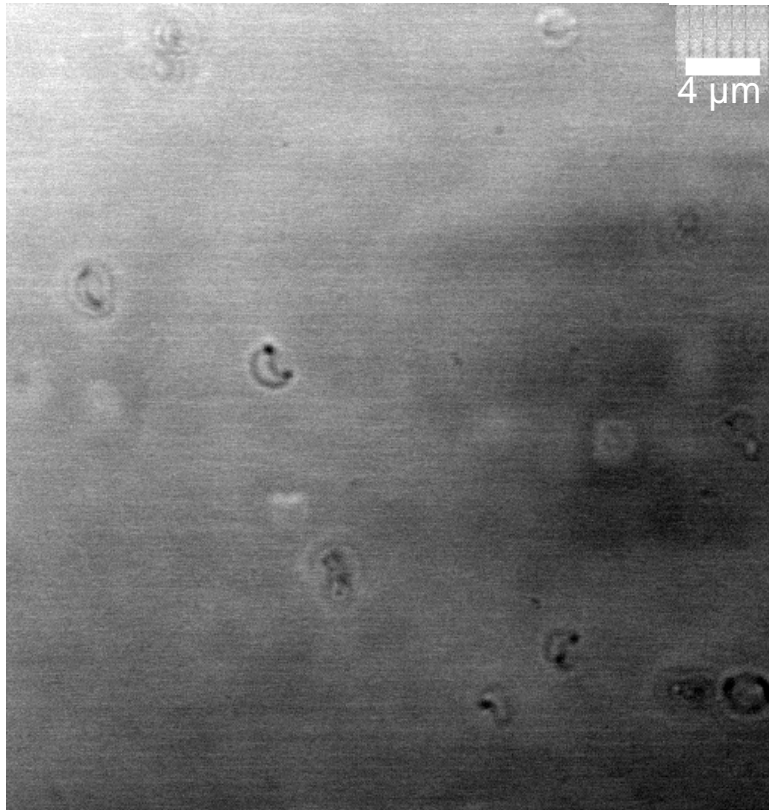
    - Conclusion, perspectives

# Déformation en solution par dissolution du solvant enclos

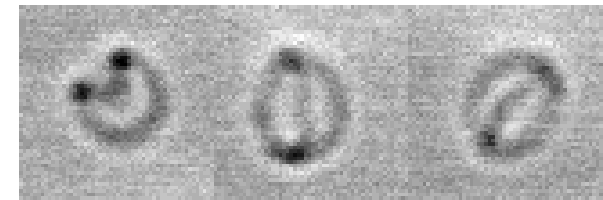


Déformation de toutes les coquilles  
d'une suspension monodisperse

## Formes de flambage :

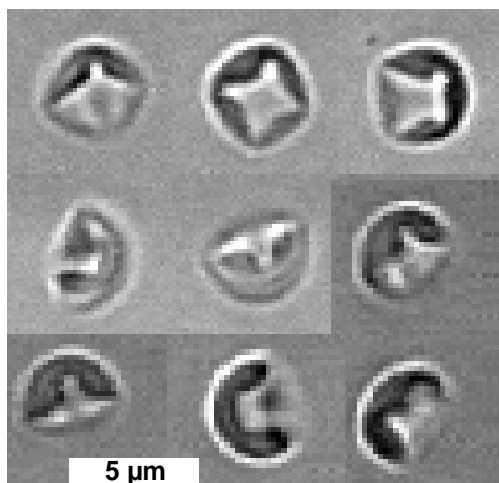


Grains de café

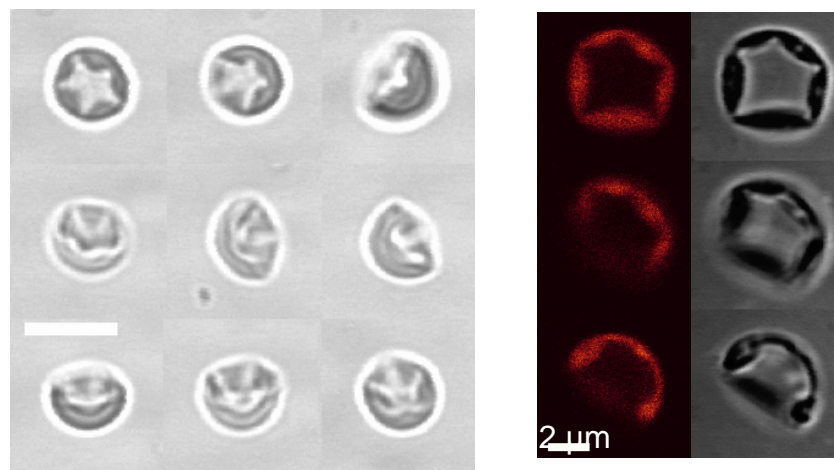


(3 vues d'un même objet)

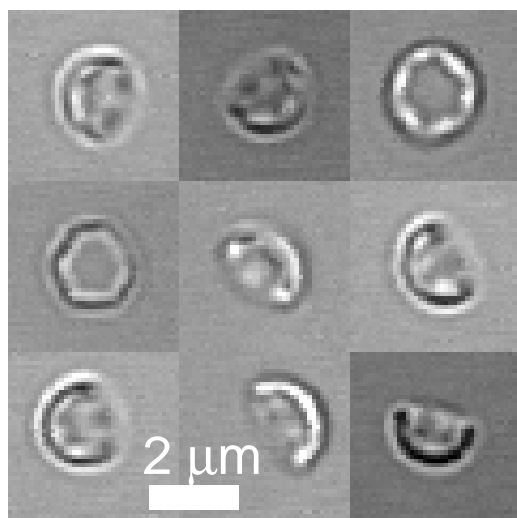




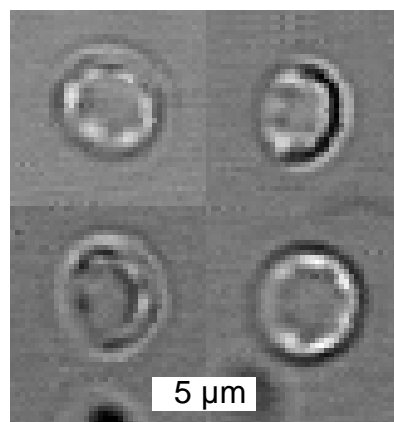
Bol à 4 plis



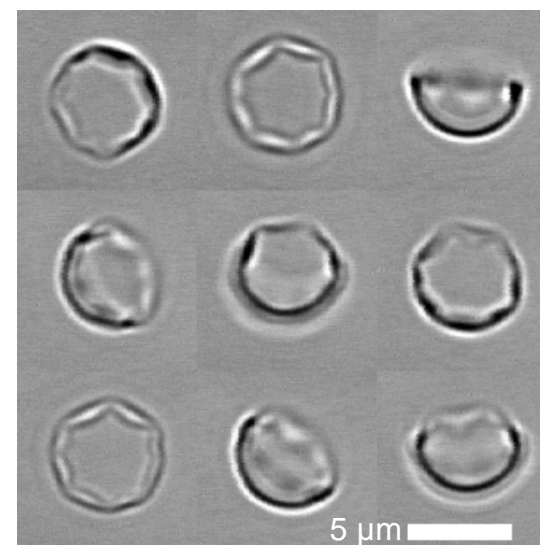
Bol à 5 plis



Bol à 6 plis

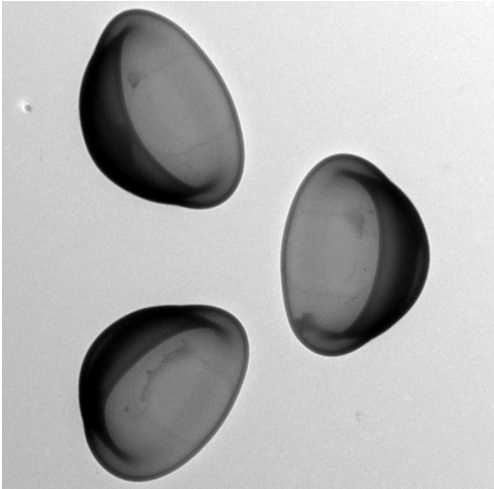


Bol à 7 plis



Bol à 8 plis

Coquilles évaporées dans l'air :



Dried shell (« capsule »),  
initial diameter 1,68  $\mu\text{m}$   
(transmission electronic microscopy)



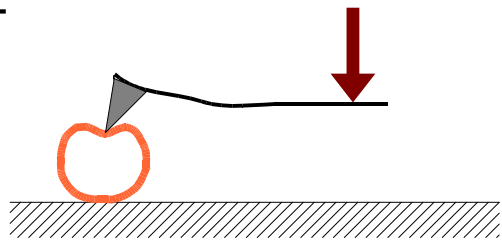
Dried shell, diameter  $\sim 4 \mu\text{m}$   
(transmission optical microscopy)

Formes dues à des inhomogénéités dans les coquilles ?

# Flambage d'origine capillaire:

épaisseur relative ( $d/R$ )  
maximum au flambage

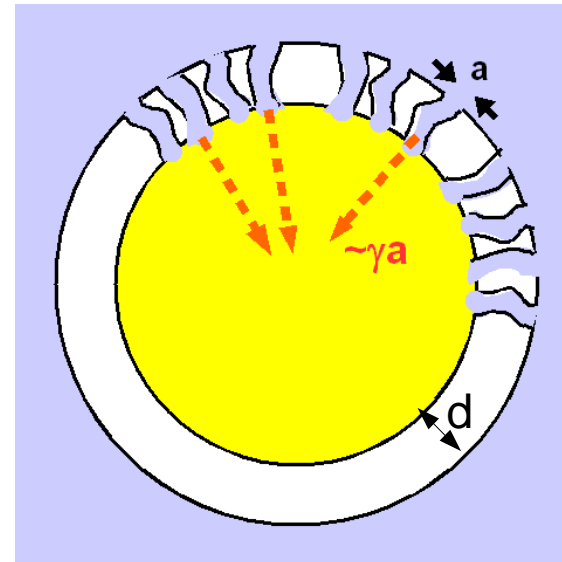
+



nanoindentation:  $E = 200 \text{ MPa}$   
(avec I. Ivanovska, G. Wuite,  
Vrije Univ., Amsterdam)

+

diffusion ralentie de FITC  $\sim 1 \text{ nm}$   
à travers pores



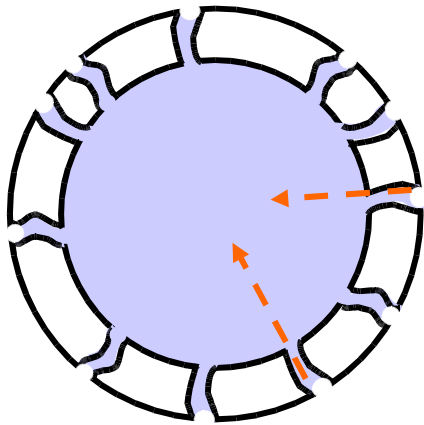
Pression extérieure équivalente:  $P \# \gamma/a$

Flambage lorsque  $P \sim E (d/R)^2$  (Landau)

$\rightarrow a \sim 4 \text{ nm}$

$P_{\text{eff}} \sim 7 \text{ MPa}$  (éq. pression osmotique 2,8 M)

Idem flambage lors d'évaporation:



("instabilité du petit pois")

+ stabilisation par contact (VdW)



© paulashouseoftoast.blogspot.com

→ élasticité de coques minces ?

- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

- Déformation de coquilles

  - Flambage en solution

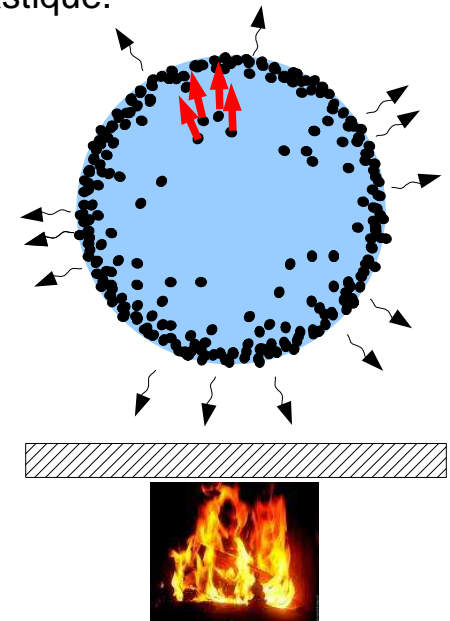
  - Formes de flambage

  - Conclusion, perspectives

Quelle forme prend un ballon en sous-pression ?

# Flambage en évaporation :

Goutte de suspension colloïdale ( $r=85\text{nm}$ ) en évaporation sur une plaque chauffante, soulevée par sa propre vapeur (effet Leidenfrost). Flambage lorsque les particules colloïdales drainées vers la surface sont au contact et forment une coque élastique.



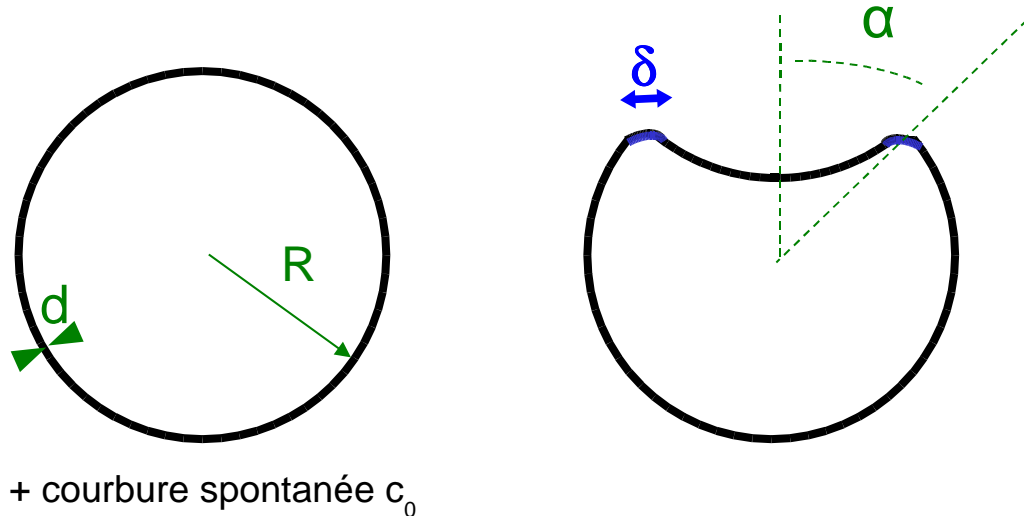
Simulation Surface Evolver

*Tsapis, Dufresne, Sinha, Riera, Huchinson, Mahadevan, Weitz, PRL 94 (2005) 018302*

plusieurs dépressions ?!

# Modélisation d'une conformation à plusieurs dépressions: modèle de pure courbure

Pour ~~une~~ dépression unique:  
N



largeur du pli circulaire:  $\delta \sim (Rd)^{1/2}$  (Landau)  
rayon de courbure dans le pli:  $\delta/\text{tg } \alpha$  (Pogorelov 1988, Pauchard 1997)

Energie élastique de la déformation (pli + inversion calotte sphérique):

$$U_{\text{elastic}} = \pi \kappa (d/R)^{-1/2} [\sin \alpha (\text{tg } \alpha - \lambda)^2 + 4 (1 - \cos \alpha) \lambda] \quad \times N$$

avec  $\lambda = c_0 R (d/R)^{1/2}$  (paramètre de courbure adimensionnée)

Variation relative de volume:

$$\Delta V/V_{\text{sphere}} = (1 - \cos \alpha)^2 (2 + \cos \alpha) / 2 \quad \times N$$

$$U_N(\Delta V/V, \lambda)$$

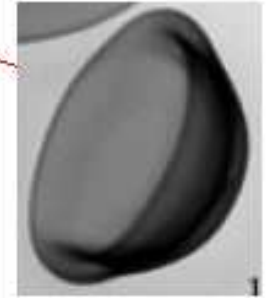
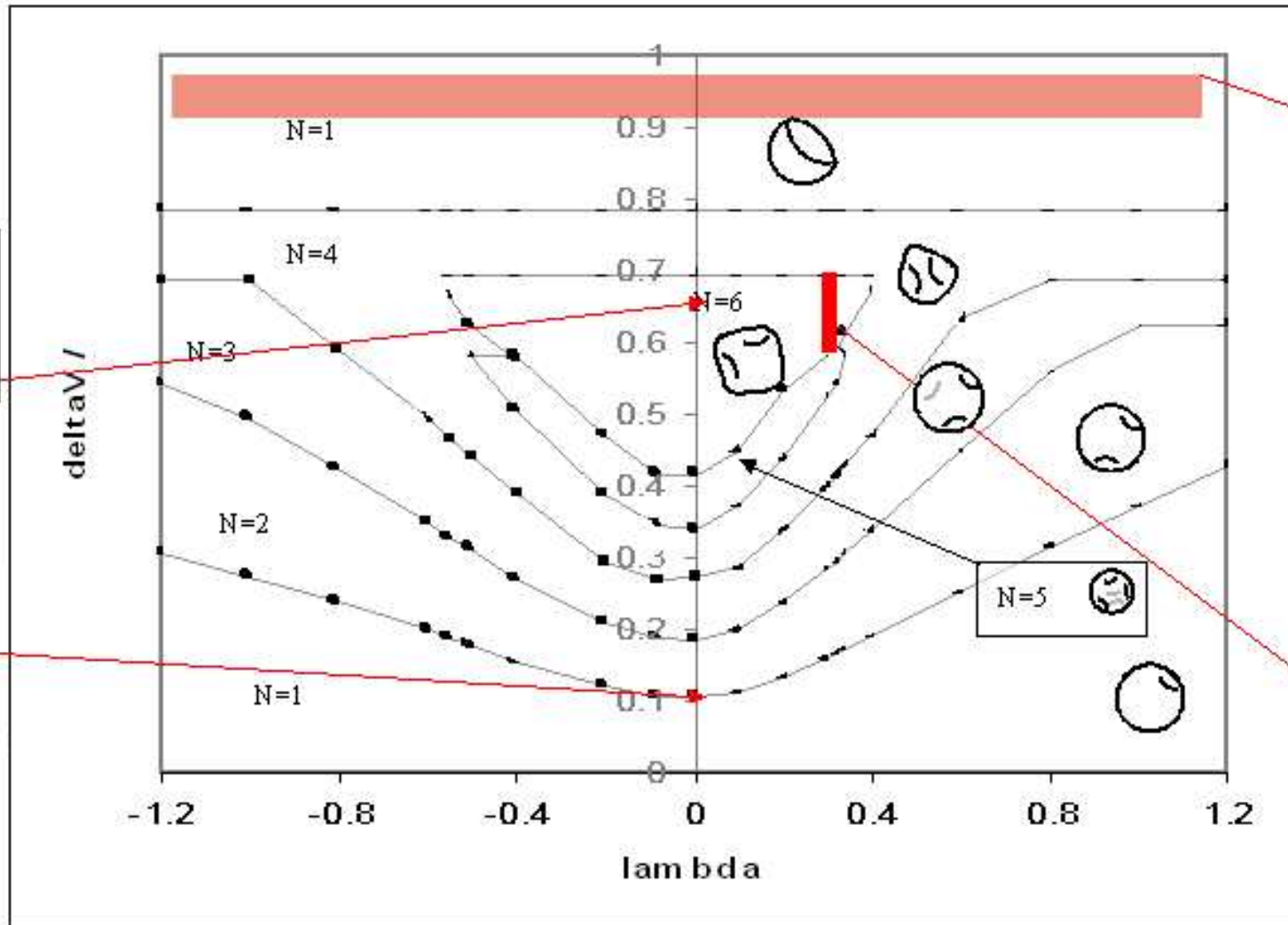




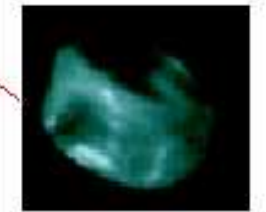
(a)



(b)



(c)



(d)

# Étude numérique (Surface Evolver, K. Brakke)

Simulation d'une surface avec énergie de courbure et de déformation élastique dans son plan:

$$F = \int_{shell\ surface} \left( \frac{1}{2} \kappa (c - c_0)^2 + \frac{1}{2} \epsilon_{ij} K_{ijkl} \epsilon_{kl} \right) dS$$

A (Young 2D)  
ν (Poisson 2D)

Lien avec les paramètres tridimensionnels de la coquille (épaisseur  $d$ , Young  $E$ , Poisson  $\nu$ ):  
(déformation « longitudinale » (Landau) = sans contraintes perpendiculaires)

## 2D→3D:

$$\nu_{3D} = \nu_{2D}$$

$$d = (1 - \nu_{2D}^2)^{\frac{1}{2}} \sqrt{12 \frac{\kappa}{Y_{2D}}}$$

$$Y_{3D} = \sqrt{\frac{Y_{2D}^3}{12 \kappa (1 - \nu_{2D})}}$$

without effect on shape (non adimensionalisable)

## 3D→2D:

$$\nu_{2D} = \nu_{3D} < 1/2$$

$$\kappa = \frac{Y_{3D}}{12(1 - \nu_{3D})} d^3$$

$$Y_{2D} = Y_{3D} \times d$$

~ d

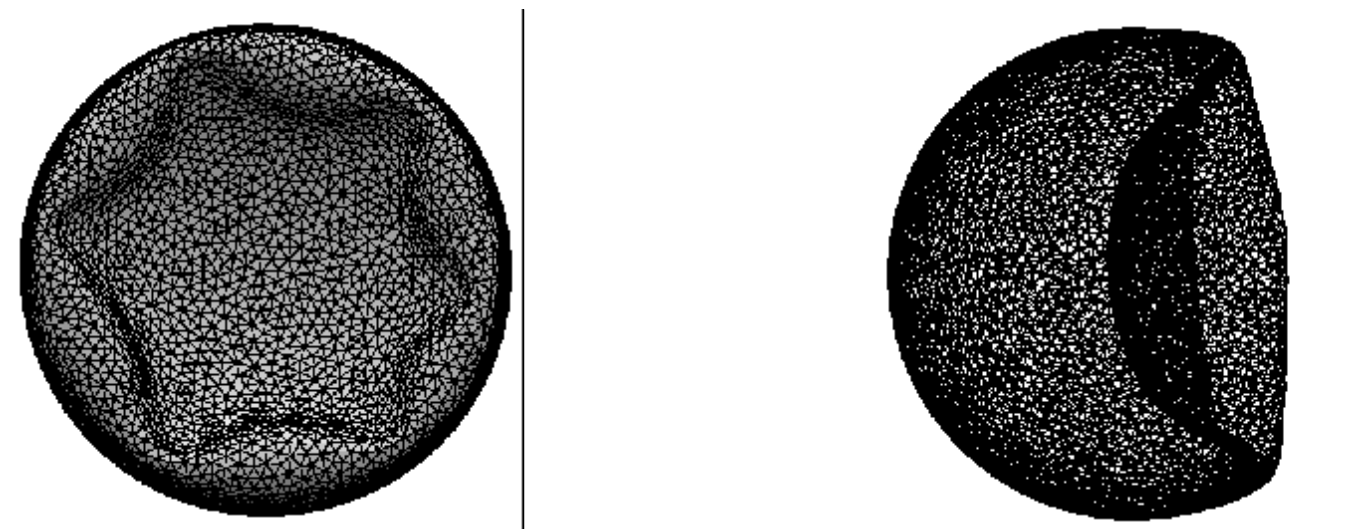
$$\text{shape} = f(\nu_{2D}, \kappa/Y_{2D})$$

## Simulations:

- $\epsilon_{ij}$  calculés à partir de l'état sphérique initial (sans contrainte:  $c_0=1/R$ )
- volume décru par pas; minimisation à chaque pas avec cycle à  $c_0=0$  pour sortir du minimum relatif à plusieurs dépressions.

## Simulations:

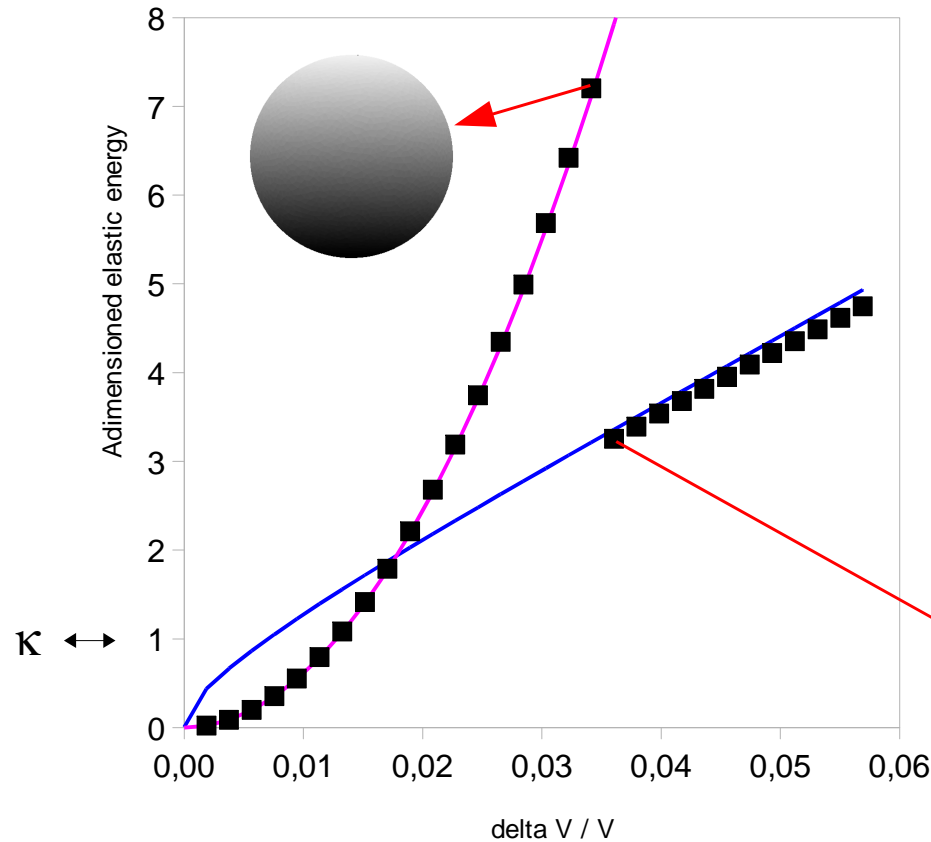
- $\epsilon_{ij}$  calculés à partir de l'état sphérique initial
- volume décru par pas; minimisation à chaque pas avec cycle à  $c_0=0$  pour sortir du minimum relatif à plusieurs dépressions.



(même coquille, de face et de profil)

# Résultats:

- Premier flambage brutal vers une conformation à dépression axisymétrique unique.

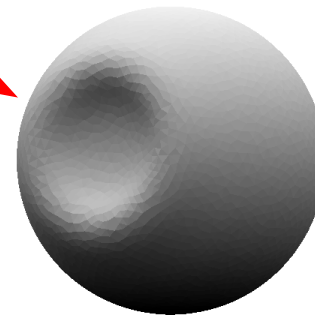


■ : énergie fournie par les simulations

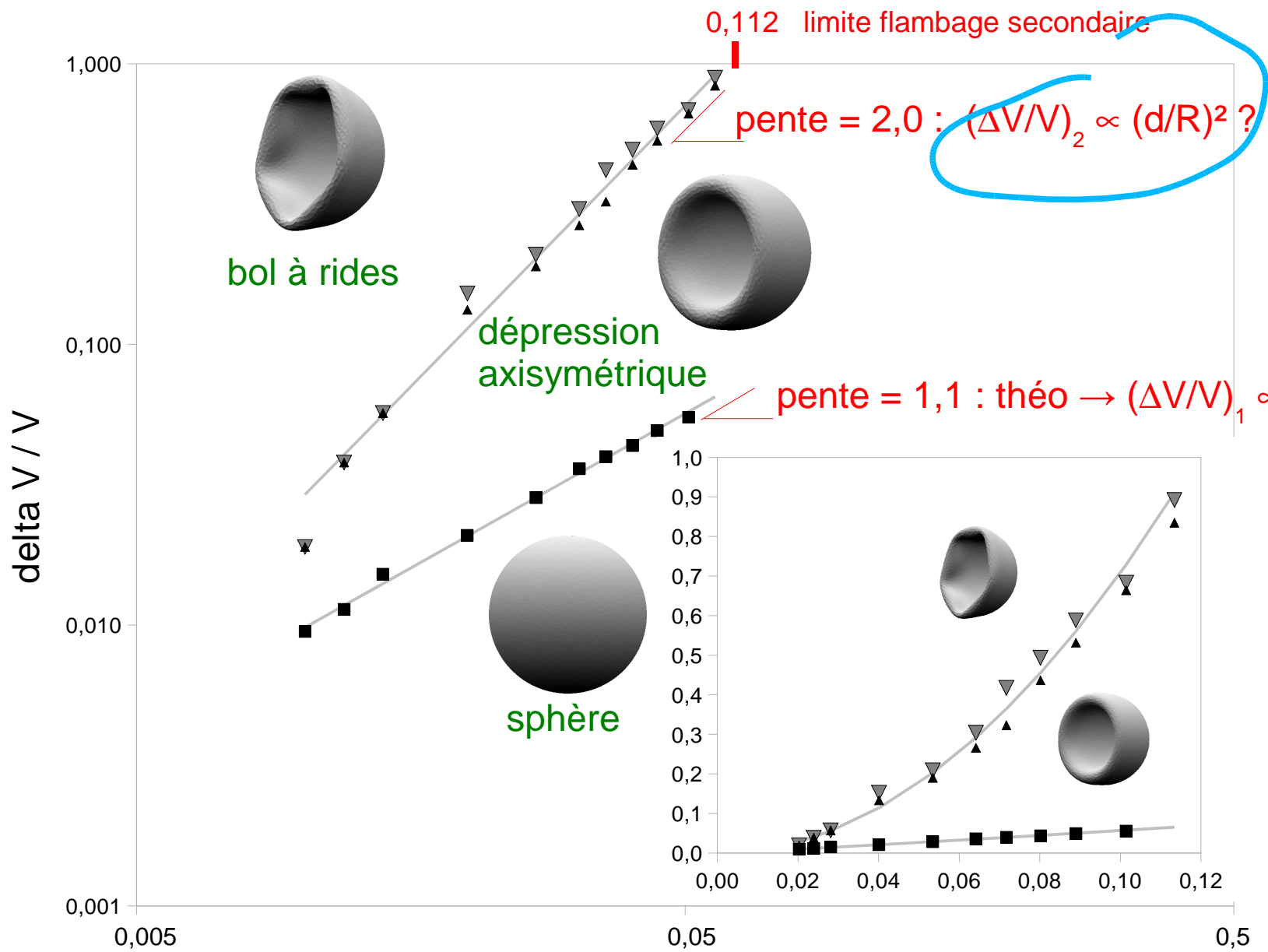
cohérente avec calculs d'énergie élastique:

$$U_{sphere} = 4\pi R^2 \times \frac{A}{9(1-\nu)} \left( \frac{\Delta V}{V} \right)^2$$

$$U_1(\Delta V/V, \lambda) \text{ avec } \lambda = (d/R)^{1/2} \quad (C_0 = 1/R)$$

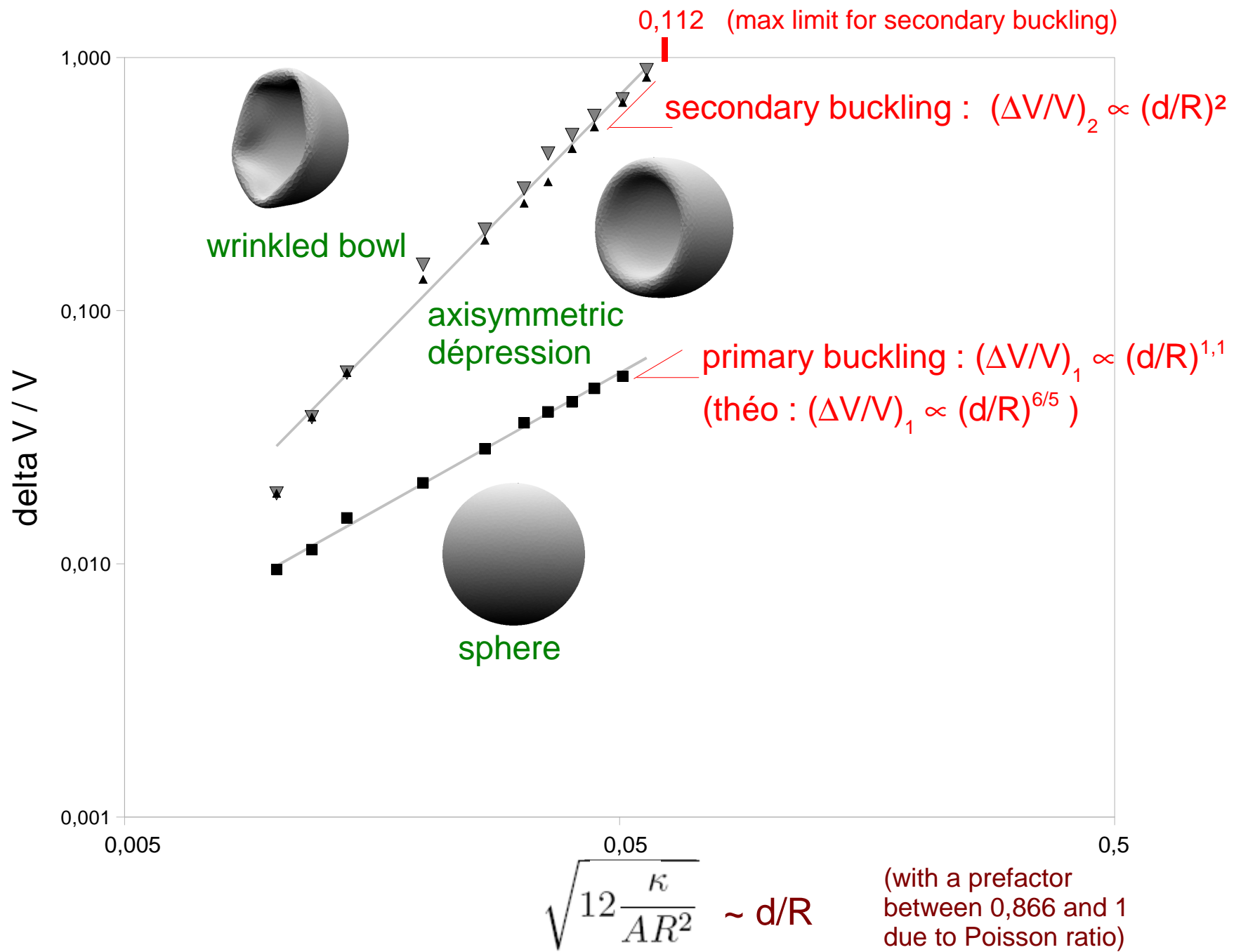


- Deuxième flambage plus progressif vers une conformation « bol à rides ».

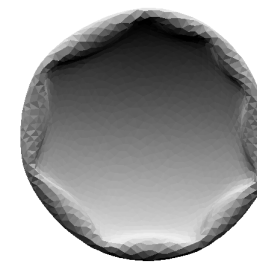
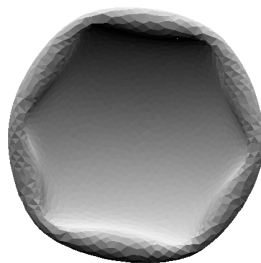
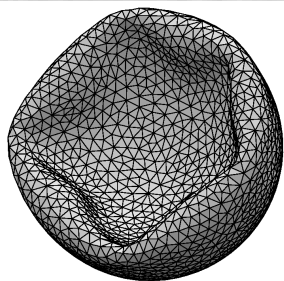
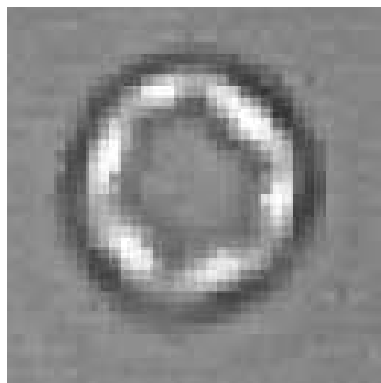
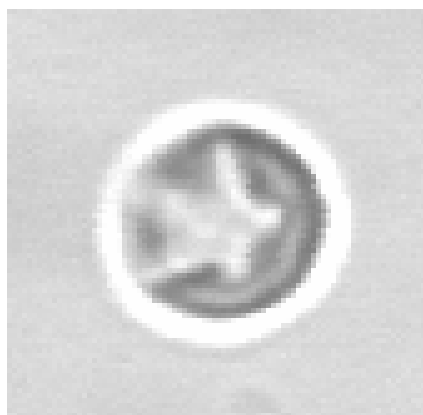
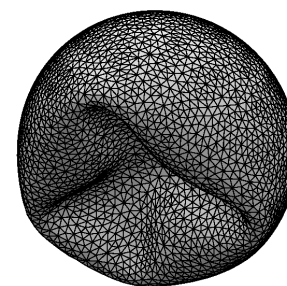
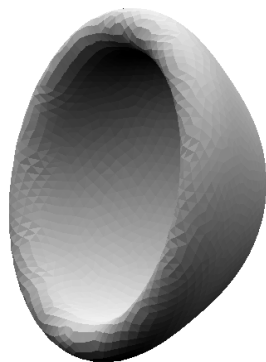
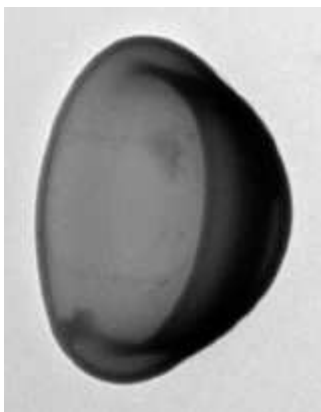


$$\sqrt{12 \frac{\kappa}{AR^2}} \sim d/R$$

(with a prefactor between 0,866 and 1 due to Poisson ratio)



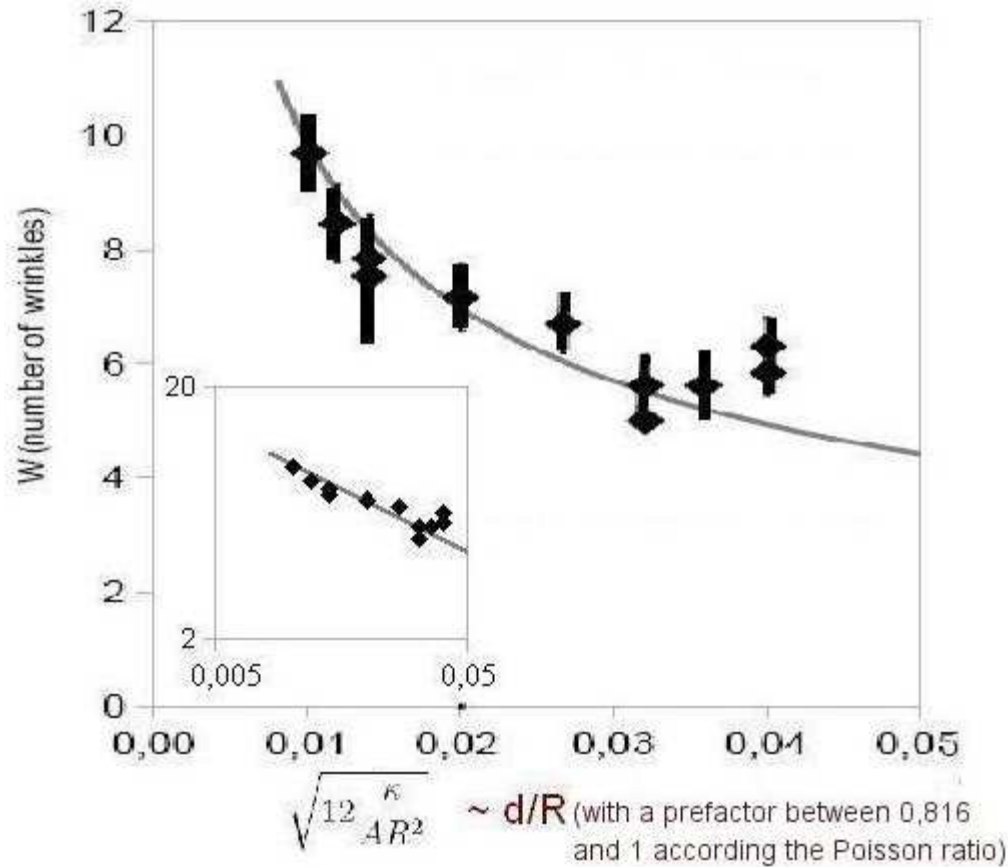
Comparaison simulations et colloïdes flambés:





## Le nombre de rides peut-il donner $d/R$ ?

En moyennant  $W$  (grandeur très bruitée):



$$W \propto (d/R)^{-1/2}$$

Compatible avec des structures de taille  $(dR)^{1/2}$  (pli d'une dépression)  
sur un équateur  $\propto R$

- Propriétés géométrico-topologiques de mousses

- Déformation de coquilles

  - Flambage en solution

  - Formes de flambage

  - Conclusion, perspectives

## Conclusion: déformation de coques

- Déformation d'objets colloïdaux par dissolution du solvant enclos (inédit): comparable à une forte pression osmotique, alors que pores > soluté classiques.
- Formes reproduites par simulations de coques minces élastiques homogènes:  
hétérogénéité
- On sait maintenant comment se dégonfle un ballon:  
en bol, d'autant plus ridé que le ballon est mince.

## Perspectives: déformation de coques

- (Synthèse: particules colloïdales anisotropes)
- Incidence du flambage secondaire (dépression axisymétrique → rides):  
pourquoi  $(\Delta V/V)_2 \propto (d/R)^2$  ?  
Localisation des énergies pertinentes grâce aux simulations ?
- Rôle du coefficient de Poisson ?
- Compétition structures bol ridé / dépressions multiples ?  
(simulations + expériences microfluidiques)
- Application des résultats et/ou de la démarche à d'autres systèmes: vésicules, cellules, organisations végétales



Special thanks to Ella F. and Catherine R.