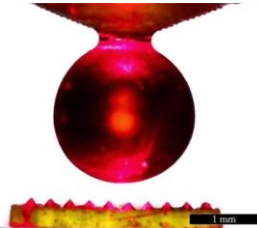


LE MODÈLE PHYSIQUE : UN OUTIL POUR APPRÉHENDER LES SYSTÈMES COMPLEXES ?



Sommaire

Partie 1 : Cours scientifique, le physicien-mécanicien

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

Sommaire

- Partie 1 : Cursus scientifique, le physicien-mécanicien
1. Un parcours non linéaire : fluides, solides et plantes
 2. Principaux résultats scientifiques
 3. Encadrement doctoral et postdoctoral
 4. Bilan des activités académiques
- Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle
- Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

Sommaire

Partie 1 : Coursus scientifique, le physicien-mécanicien

1. Un parcours non linéaire : fluides, solides et plantes

2. Principaux résultats scientifiques

3. Encadrement doctoral et postdoctoral

4. Bilan des activités académiques

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1.1 Cursus scientifique, le physicien-mécanicien

2007-2011

Formation en physique



M2 : Physique des liquides et de la matière molle (Très Bien)

M2 : Philosophie des sciences (Bien)

2011-2015

Thèse en interaction fluide structure (Très honorable)



E. de Langre



M. Sautreau

2015-2017

PostDoc : Microfluidics lab



T. Gilet

1.1 Cursus scientifique, le physicien-mécanicien

2017-2020

Chargé de recherche FNRS (Belgique)



T. Gilet



J. Bush

2020-2026

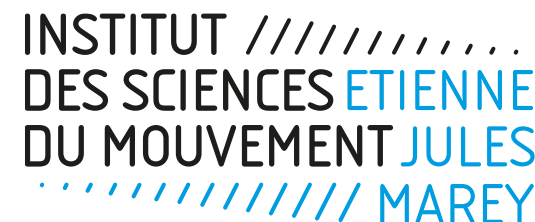
Aix-Marseille Université

Institut des sciences du mouvement

Équipe Systèmes BioInspirés (SBI)



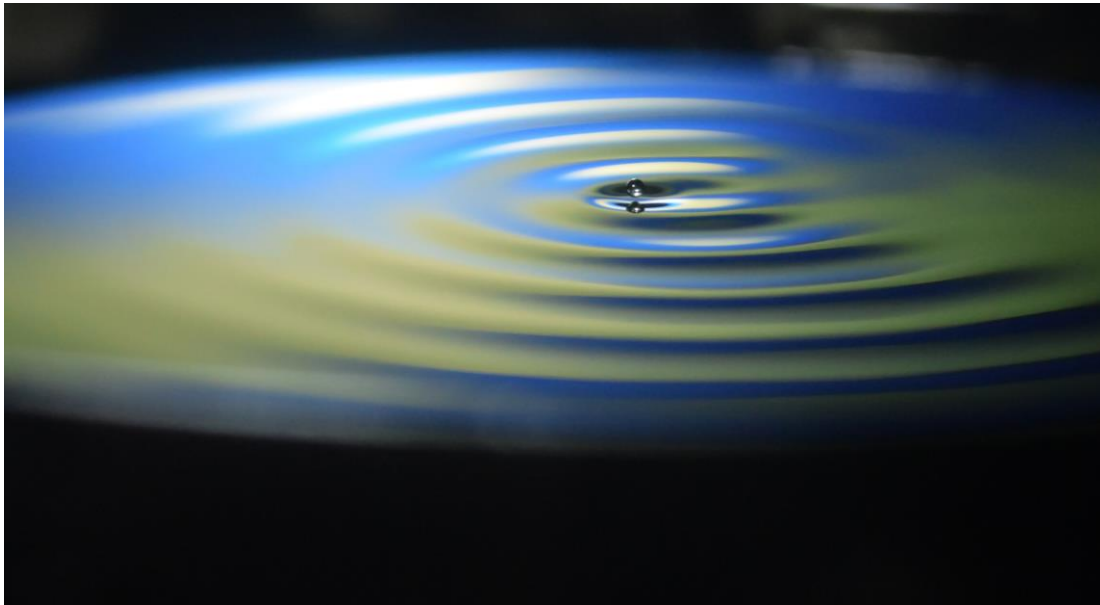
J-M. Linares



Sommaire

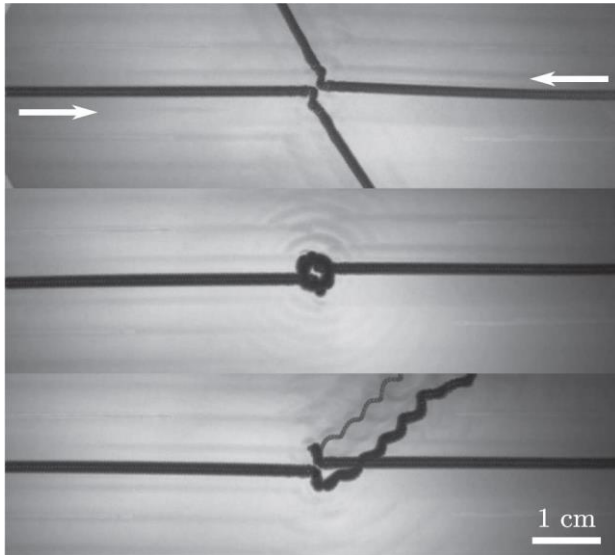
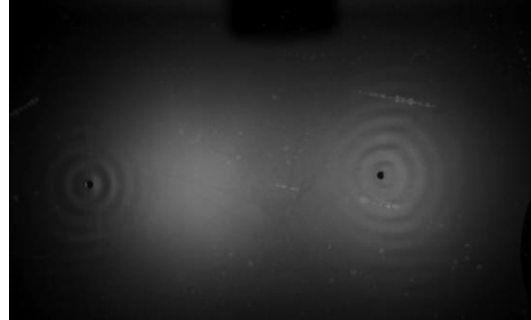
- Partie 1 : Coursus scientifique, le physicien-mécanicien
1. Un parcours non linéaire : fluides, solides et plantes
 - 2. Principaux résultats scientifiques**
 3. Encadrement doctoral et postdoctoral
 4. Bilan des activités académiques
- Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle
- Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1.2 Principaux résultats scientifiques (post thèse)



1. Théorie visqueuse de l'instabilité de Faraday
2. Évaluation de l'extension spatio-temporelle du champ d'onde (non-localité finie des marcheurs)
3. L'interaction de deux marcheurs est sensible aux paramètres à cause de la dynamique verticale.
4. Diffraction par une onde stationnaire : 3 pics, mais comportement différent à celui de la mécanique quantique.
5. Mise en évidence de la sensibilité de l'expérience aux paramètres extérieurs (Effet tunnel des marcheurs).

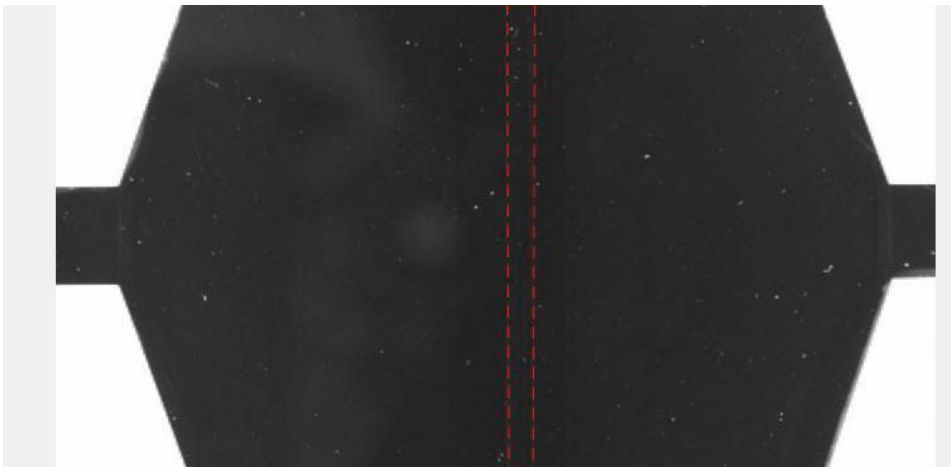
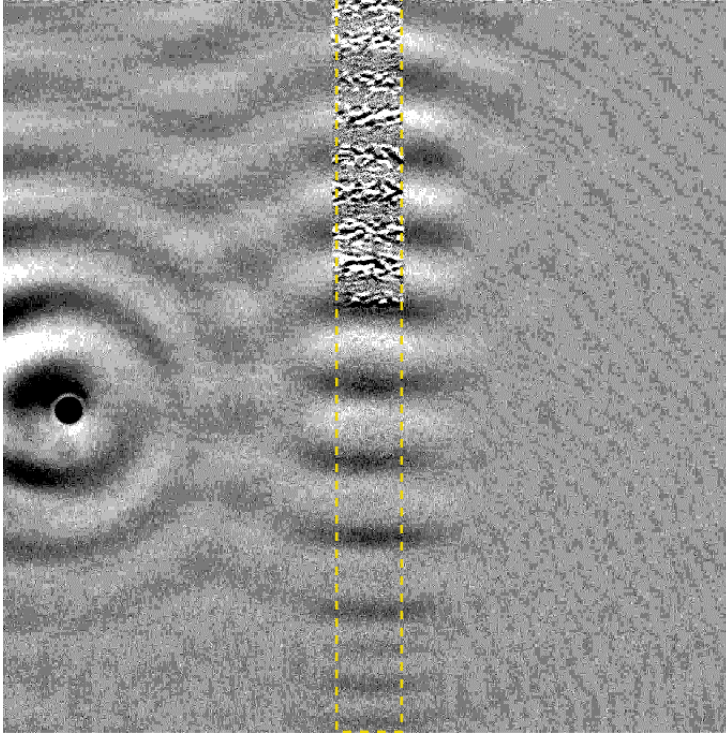
1.2 Principaux résultats scientifiques (post thèse)



1. Théorie visqueuse de l'instabilité de Faraday
2. Évaluation de l'extension spatio-temporelle du champ d'onde (non-localité finie des marcheurs)
3. L'interaction de deux marcheurs est sensible aux paramètres à cause de la dynamique verticale.
4. Diffraction par une onde stationnaire : 3 pics, mais comportement différent à celui de la mécanique quantique.
5. Mise en évidence de la sensibilité de l'expérience aux paramètres extérieurs (Effet tunnel des marcheurs).

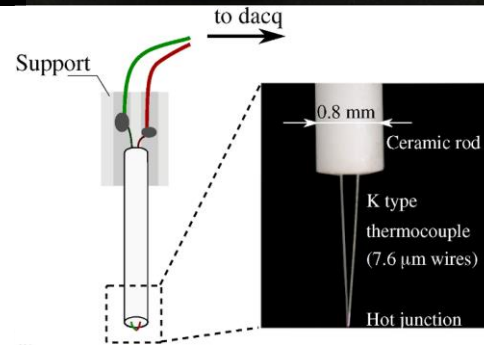
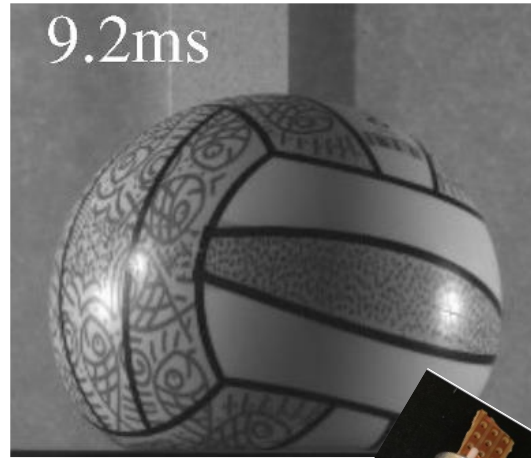
1.2 Principaux résultats scientifiques (post thèse)

Marcheurs



1. Théorie visqueuse de l'instabilité de Faraday
2. Évaluation de l'extension spatio-temporelle du champ d'onde (non-localité finie des marcheurs)
3. L'interaction de deux marcheurs est sensible aux paramètres à cause de la dynamique verticale.
4. Diffraction par une onde stationnaire : 3 pics, mais comportement différent à celui de la mécanique quantique.
5. Mise en évidence de la sensibilité de l'expérience aux paramètres extérieurs (Effet tunnel des marcheurs).

1.2 Principaux résultats scientifiques (post thèse)



1. Impact : Temps de contact et mise en évidence de l'évolution de température du gaz pendant le contact.

2. Impact : Dissipation d'énergie par vibration

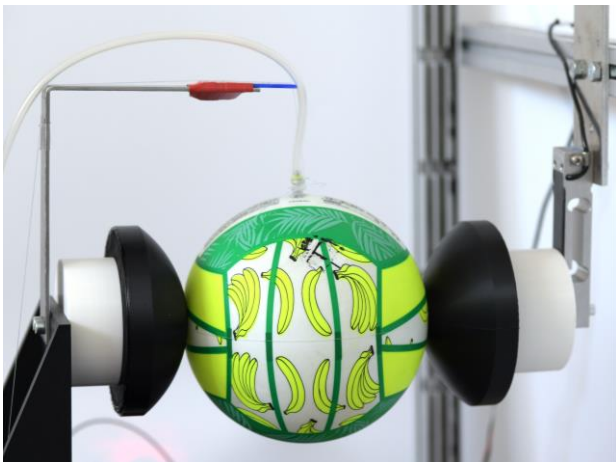
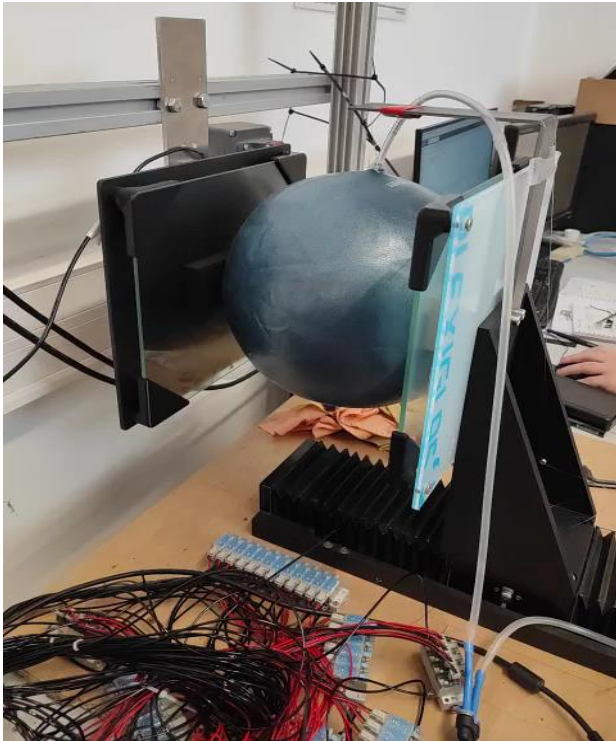
3. Contact : La force de contact d'une membrane sphérique dépend de la transformation thermodynamique du gaz

4. Contact : La force de contact d'une membrane sphérique dépend de la forme de l'indenteur

5. La rigidité des milieux cellulaires pressurisés dépend de la transformation thermodynamique du fluide

6. La rigidification à l'élongation du mur cellulaire est une explication compatible à la rigidification induite par turgescence

1.2 Principaux résultats scientifiques (post thèse)



1. Impact : Temps de contact et mise en évidence de l'évolution de température du gaz pendant le contact.

2. Impact : Dissipation d'énergie par vibration

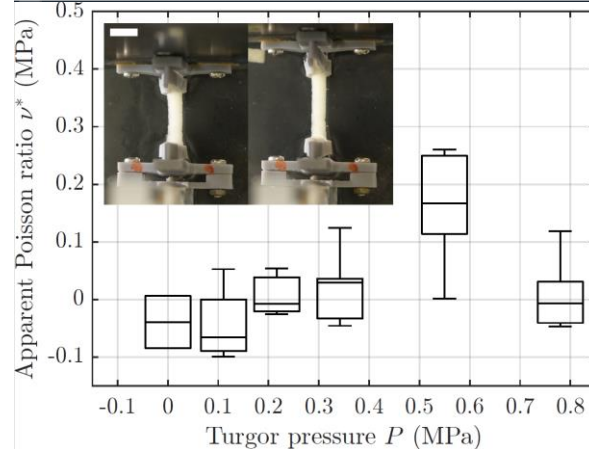
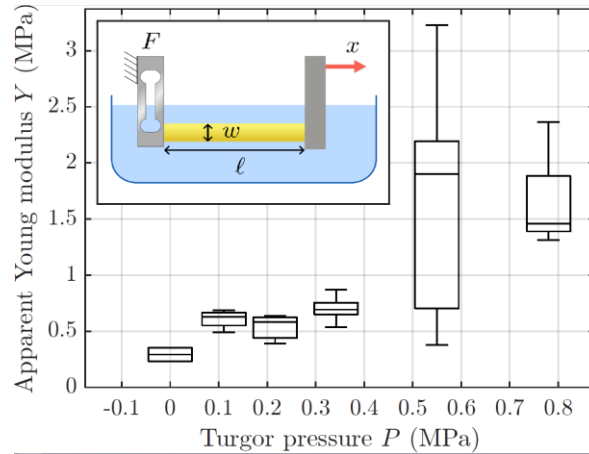
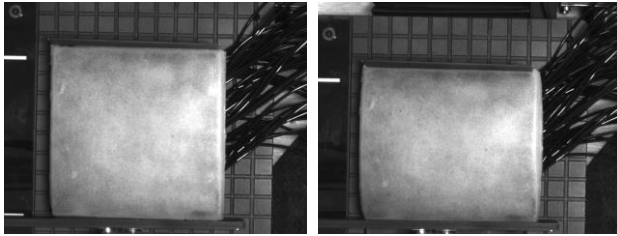
3. Contact : La force de contact d'une membrane sphérique dépend de la transformation thermodynamique du gaz

4. Contact : La force de contact d'une membrane sphérique dépend de la conformité du contact

5. La rigidité des milieux cellulaires pressurisés dépend de la transformation thermodynamique du fluide

6. La rigidification à l'élongation du mur cellulaire est une explication compatible à la rigidification induite par turgescence

1.2 Principaux résultats scientifiques (post thèse)



1. Impact : Temps de contact et mise en évidence de l'évolution de température du gaz pendant le contact.

2. Impact : Dissipation d'énergie par vibration

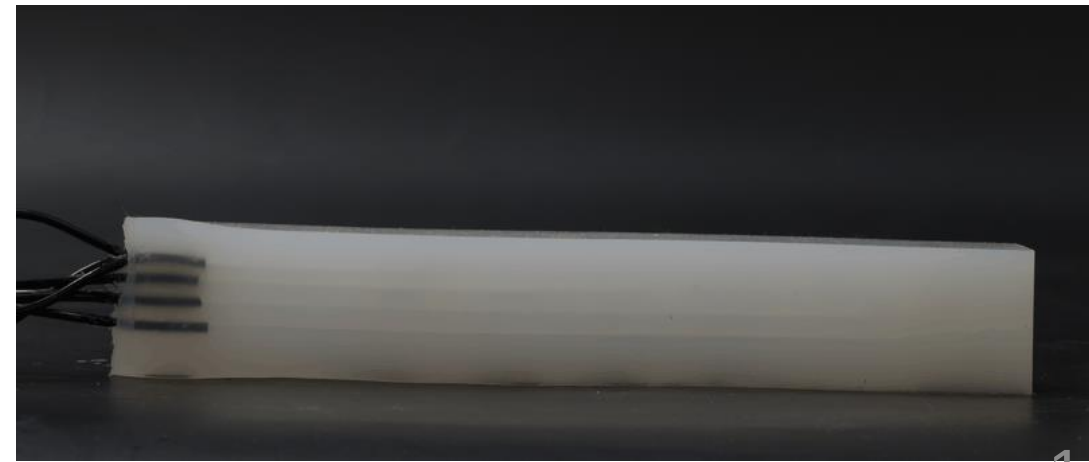
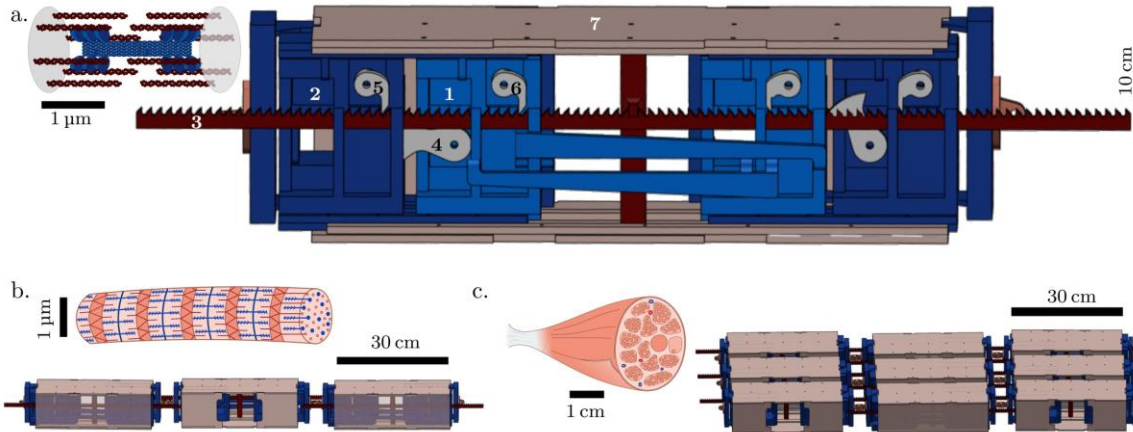
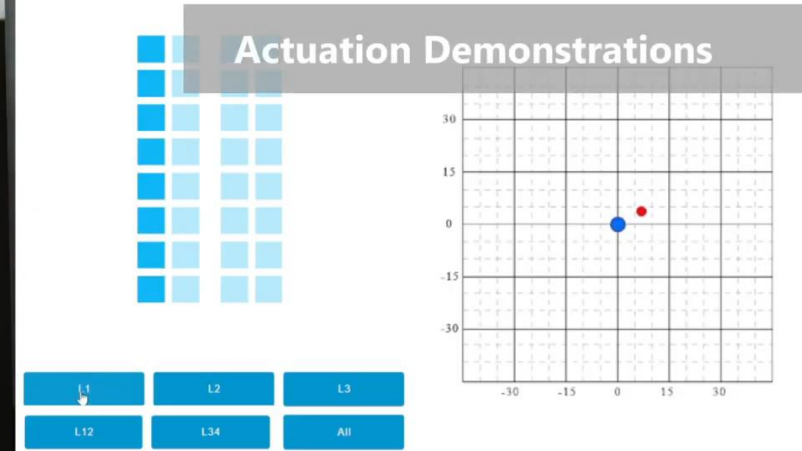
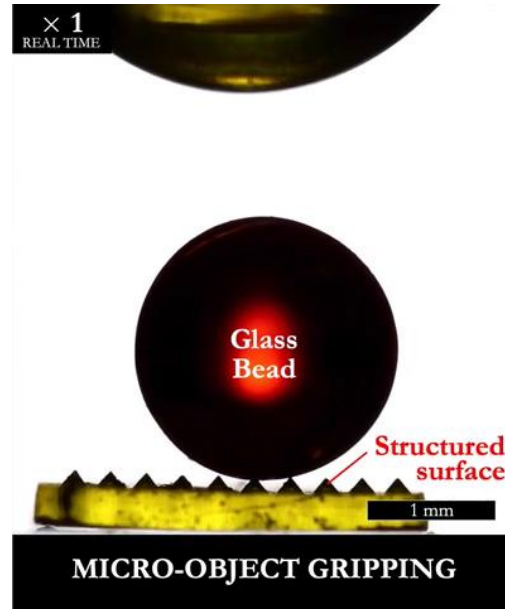
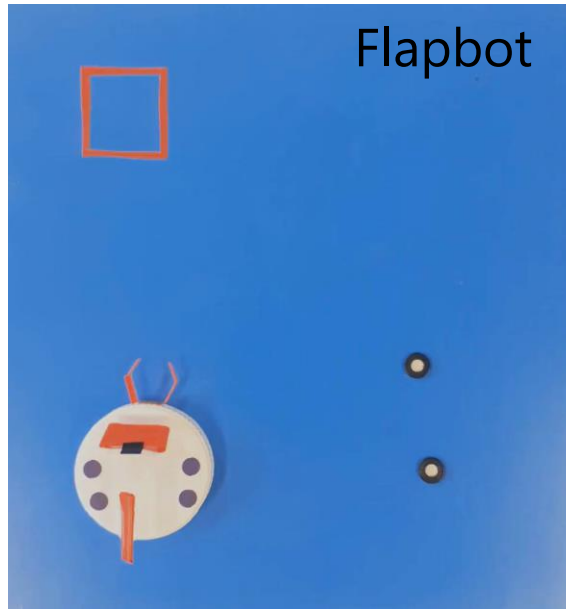
3. Contact : La force de contact d'une membrane sphérique dépend de la transformation thermodynamique du gaz

4. Contact : La force de contact d'une membrane sphérique dépend de la conformité du contact

5. La rigidité des milieux cellulaires pressurisés dépend de la transformation thermodynamique du fluide

6. La rigidification à l'élongation du mur cellulaire est une explication compatible à la rigidification induite par turgescence

1.2 Principaux résultats scientifiques (post thèse)



Sommaire

- Partie 1 : Cursus scientifique, le physicien-mécanicien
- 1. Un parcours non linéaire : fluides, solides et plantes
 - 2. Principaux résultats scientifiques
 - 3. Encadrement doctoral et postdoctoral**
 - 4. Bilan des activités académiques
- Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle
- Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1.3 Encadrement doctoral et postdoctoral

2021-2022



Younes Mammadi

Statut : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche - ATER

Financement : Aix-Marseille Université

Résultats scientifiques : Gonflage d'un milieu cellulaire

Publication : 1

Statut actuel : Enseignant chercheur (ENSAM, Aix-en-Provence)

2023-2025



Paul Lacorre

Statut : Chercheur Post-Doctorant – PostDoc

Financement : ANR MEXP

Résultats scientifiques : Rigidité dépendante de la pression et des processus thermodynamiques chez les solides cellulaires pressurisés

Publications : 1 (+2 soumises, +1 en préparation)

Statut actuel : Postdoc CVUT (Czech technical university in Prague)

1.3 Encadrement doctoral et postdoctoral

2021-2024



Juliette Lepagneul

Statut : Chercheuse Doctorante

Financement : Cifre Airbus Helicopters

Résultats scientifiques : Efforts entre filets sur une vis-à-rouleaux

Publications : 3

Statut actuel : Ingénieur spécialiste chez Airbus Helicopters

2021-2025



Raphaël Perrier

Statut : Chercheur Doctorant – Moniteur enseignement

Financement : Ecole doctorale Science du mouvement humain 363

Résultats scientifiques : Résilience par redondance à la méso-échelle

Publications : 2

Statut actuel : Ingénieur mécatronique chez MARS zone 404

1.3 Encadrement doctoral et postdoctoral

2023-2026



Louison Fiore

Statut : Chercheur Doctorant – Moniteur enseignement

Financement : ANR MEXP

Résultats scientifiques : Rigidité des milieux pressurisés & résilience d'un actionneur cellulaire.

Publications : 1 + 2 soumises + 1 en préparation

2026-2029



Malaury Bertin

Statut : Chercheur Doctorant – Moniteur enseignement

Financement : Agence de l'innovation de défense

Début : 01/10/2026

Statut actuel : Ingénieur d'étude CNRS

1.3 Encadrement doctoral et postdoctoral

2026 (6 mois)

Léo Wurtz



Statut : Ingénieur de recherche

Financement : CNRS innovation

2026 (12 mois)

Malaury Bertin



Statut : Ingénieur d'étude

Financement : CNRS innovation

Sommaire

- Partie 1 : Coursus scientifique, le physicien mécanicien
1. Un parcours non linéaire : fluides, solides et plantes
 2. Principaux résultats scientifiques
 3. Encadrement doctoral et postdoctoral
 - 4. Bilan des activités académiques**
- Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle
- Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1.4 Conclusions : bilan des activités académiques

Publications (indexed JCR): 28. **H-index**: 11 JCR, 13 GoogleScholar

Communications : 18 Conférences internationales, 10 Séminaires invités

Encadrements : 2 Postdocs, 3 thèses, 2 ingénieurs, 7 M2, 24 (M1-L3-L2)

Financements recherche : ANR JCJC (320k€), FNRS (250k€), CNRS Innovation (120k€), autres (300k€)

Financements pédagogiques : FIP Inproto (53k€), FIP 3D-noPrint (46k€)

Distinctions : IUF (2026), Best Paper award (MARSS2019), Couverture journal Chaos (2018), Prix de thèse InnoVent (2015).

Enseignements : 1300h (Maths, Mécanique, biomécanique)

Sommaire

Partie 1 : Cours scientifique, le physicien-mécanicien

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

1. Qu'est-ce qu'un système modèle ?
2. Un système modèle pour la mécanique quantique ?
3. Les qualités du système modèle biomécanique
4. Les dangers du système modèle biomécanique
5. Conclusion : les systèmes modèles biomécaniques

Partie 3 : Projet de recherche , actionneurs bioinspirés

Sommaire

Partie 1 : Cours scientifique, le physicien-mécanicien

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

1. Qu'est-ce qu'un système modèle ?

2. Un système modèle pour la mécanique quantique ?

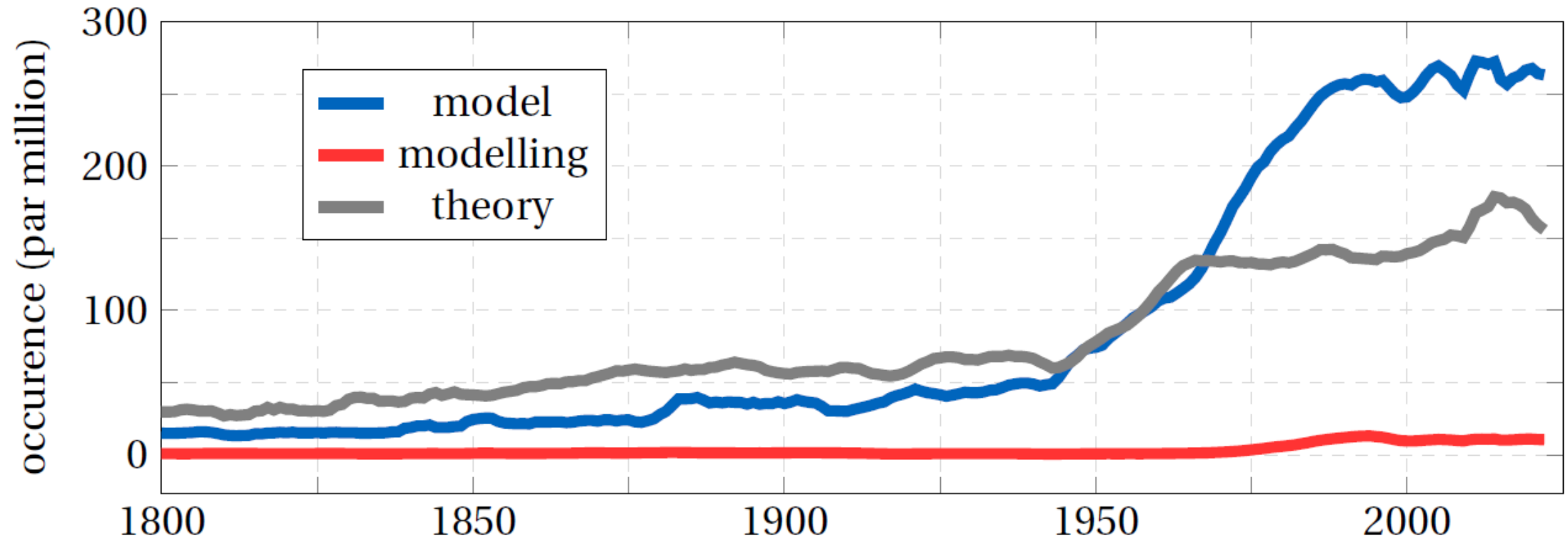
3. Les qualités du système modèle biomécanique

4. Les dangers du système modèle biomécanique

5. Conclusion : les systèmes modèles biomécaniques

Partie 3 : Projet de recherche , actionneurs bioinspirés

2.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?

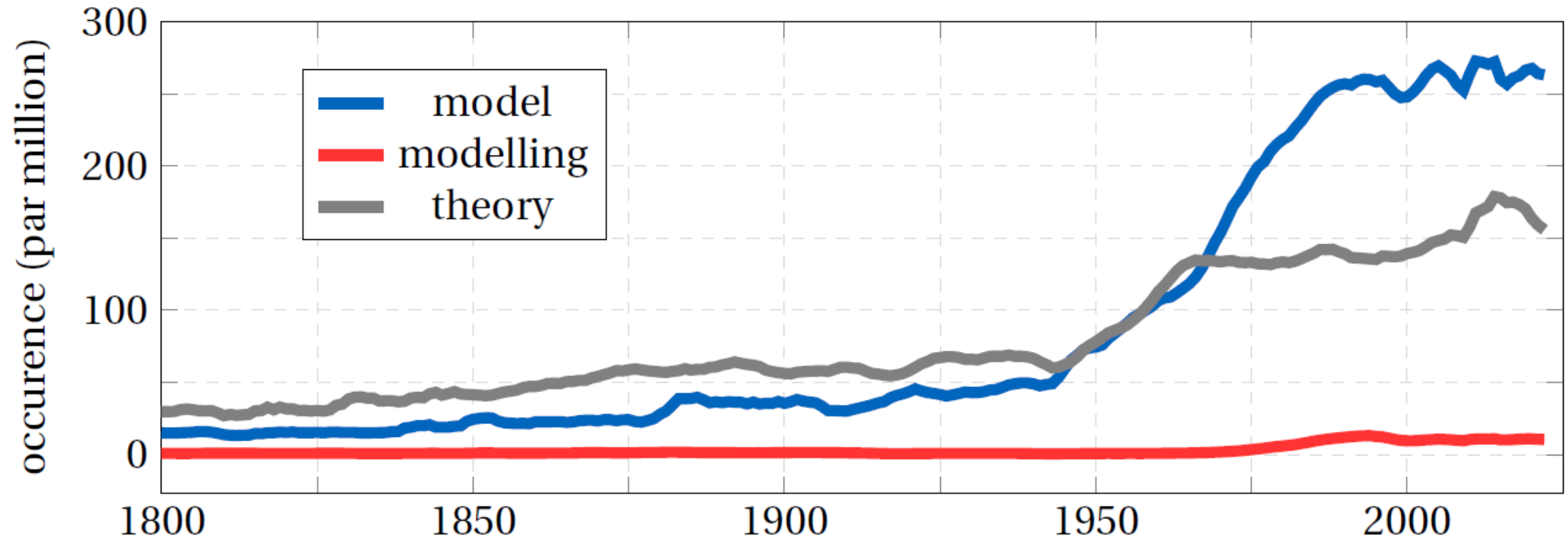


[Google Ngram]

- Du latin *modus* : mesure/ outil de mesure

- Modèle ↔
 - Théorie
 - Modèle numérique
 - Modèle vivant
 - Modèle physique
 - Modèle réduit

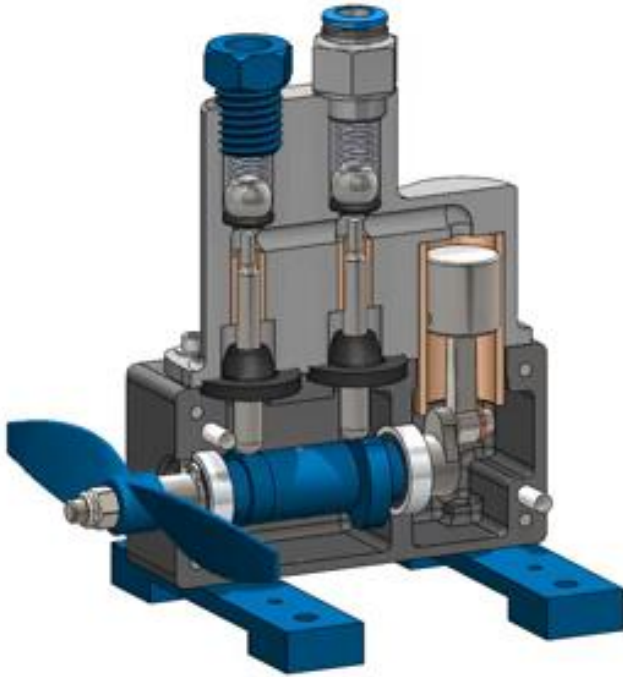
2.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?



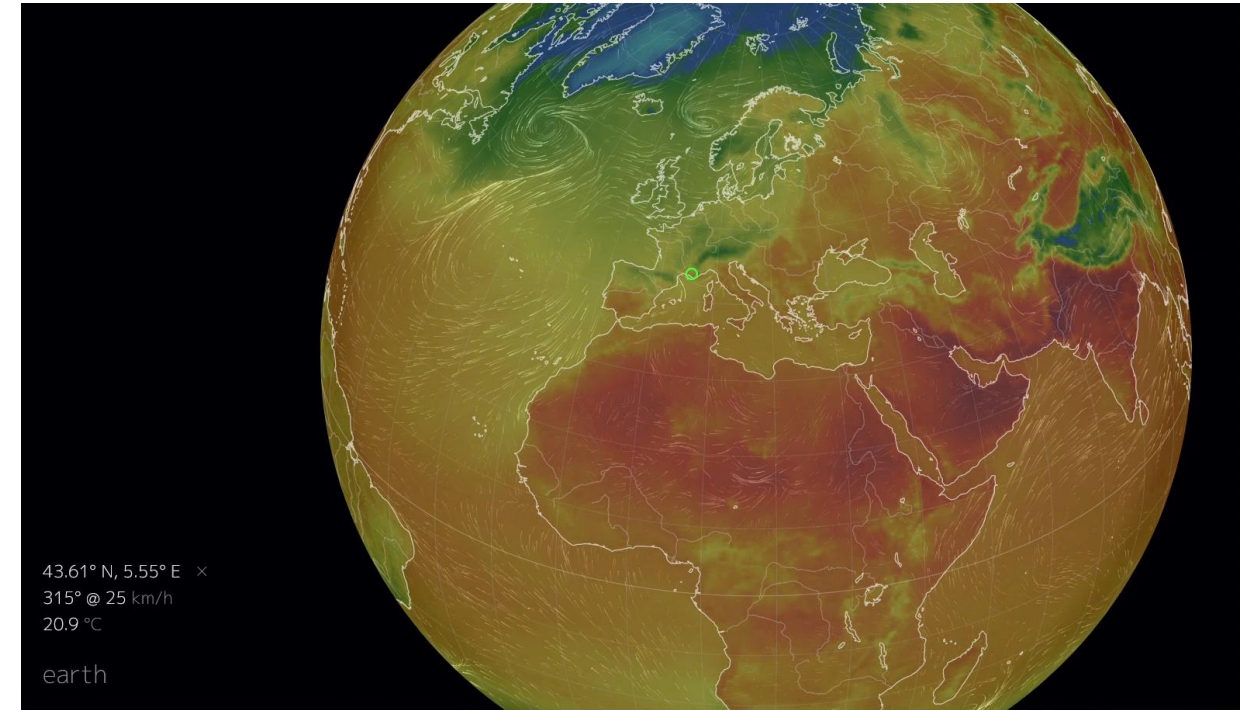
- Du latin modus : mesure/ outil de mesure

- Modèle ↔
 - Théorie
 - Modèle numérique
 - Modèle vivant
 - Modèle physique
 - Modèle réduit
 - Paradigme
 - Vocabulaire
 - Hypothèses
 - Représentation schématique
 - Mise en équation

2.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?



[A. Larossa, projet étudiant IUT GMP 2026]



[Nullschool]

- Du latin *modus* : mesure/ outil de mesure
- Modèle ↔
 - Théorie
 - **Modèle numérique**
 - Modèle vivant
 - Modèle physique
 - Modèle réduit
 - **Résolution d'équations**
 - **CAO : équations géométriques**
 - **Milieux continus : équations aux dérivées partielles**
 - **Réseaux de neurones, etc.**

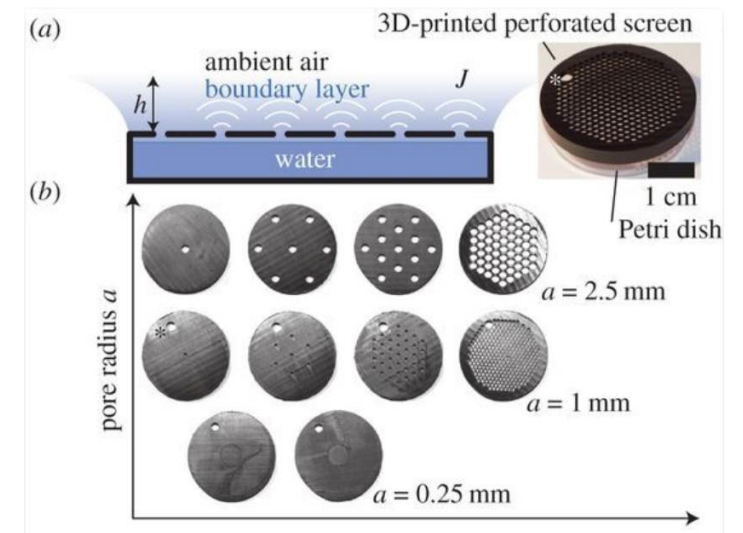
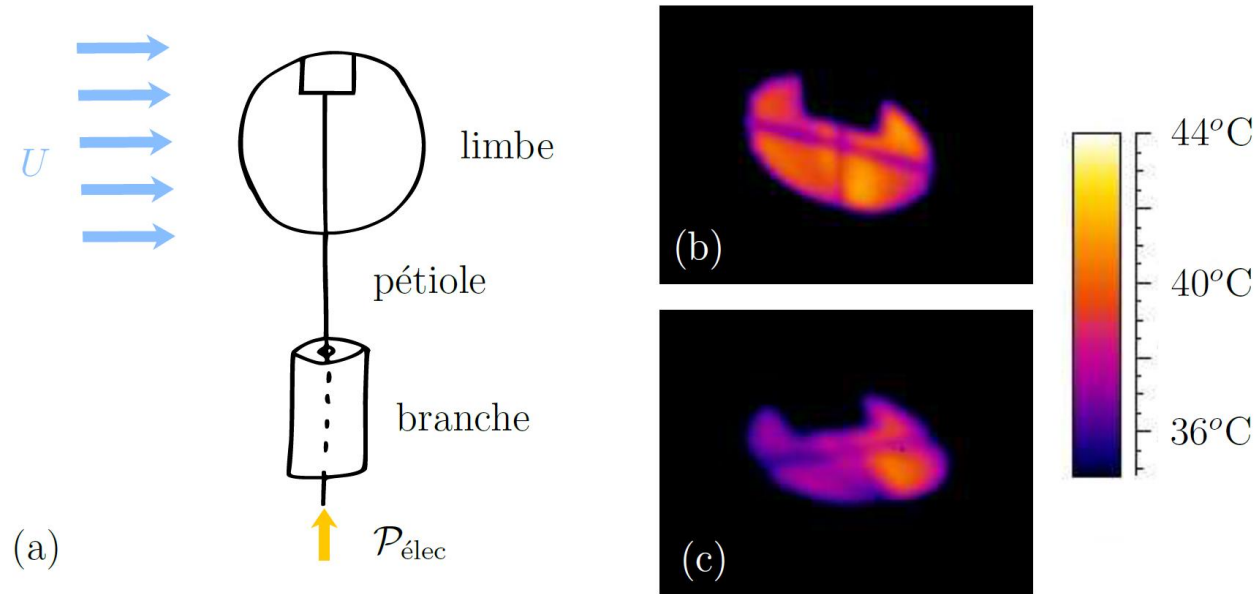
2.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?



[K. Sutliff, 1998]

- Du latin *modus* : mesure/ outil de mesure
- Modèle ↔
 - Théorie
 - Modèle numérique
 - **Modèle vivant**
 - Modèle physique
 - Modèle réduit
- « Cobayes »
- Cadavres
- Espèces bien contrôlés
- *Arabidopsis thaliana* chez les plantes

2.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?



- Du latin *modus* : mesure/ outil de mesure

- Modèle ↔
 - Théorie
 - Modèle numérique
 - Modèle vivant
 - **Modèle physique**
 - **Modèle réduit**

- **Idéalisation d'un phénomène**
- **Limite les sources de variabilité**
- **Limite les coût d'exploration**
- **Limite les temps**
- **Similitudes**

Sommaire

Partie 1 : Cours scientifique, le physicien-mécanicien

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

1. Qu'est-ce qu'un système modèle ?

2. Un système modèle pour la mécanique quantique ?

3. Les qualités du système modèle biomécanique

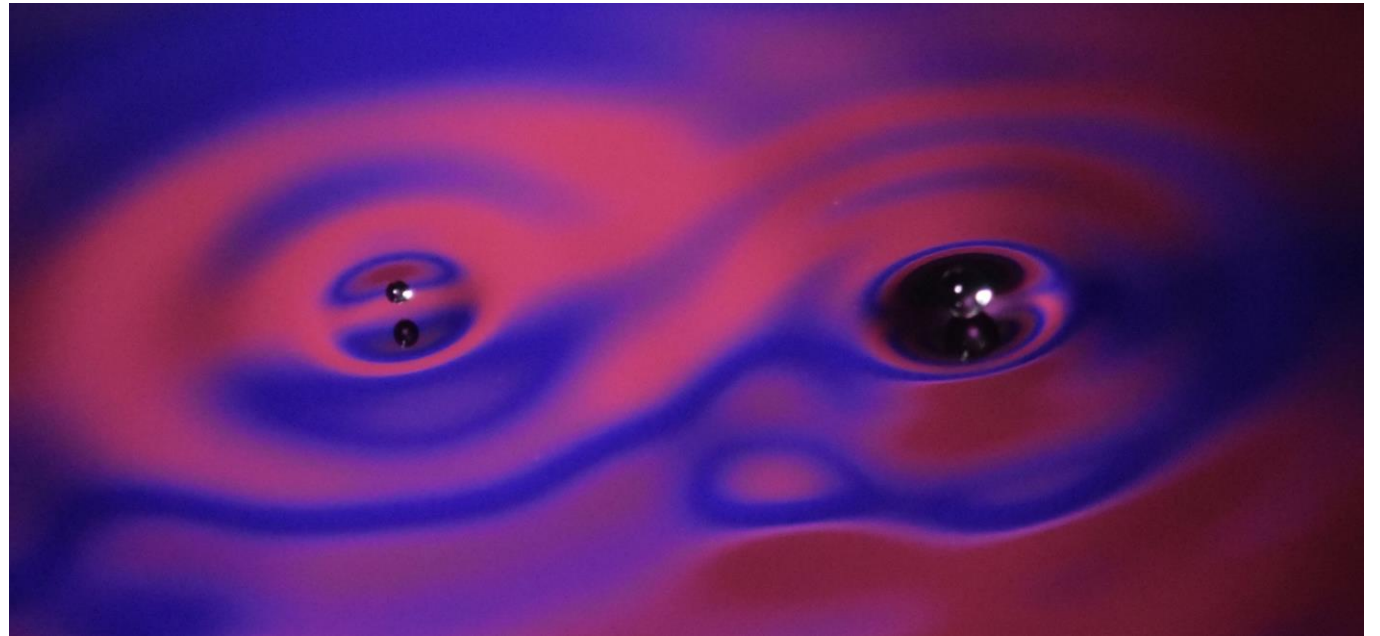
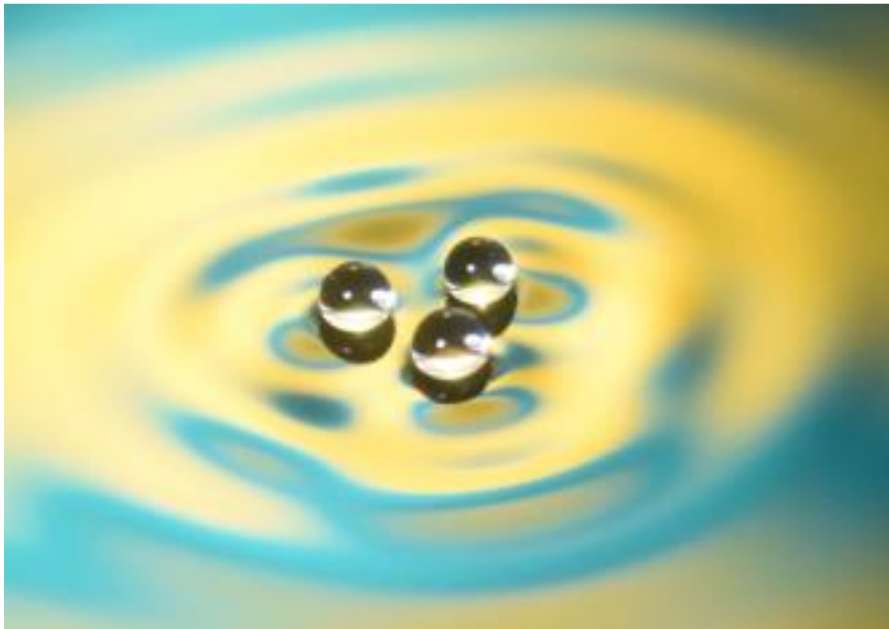
4. Les dangers du système modèle biomécanique

5. Conclusion : les systèmes modèles biomécaniques

Partie 3 : Projet de recherche , actionneurs bioinspirés

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

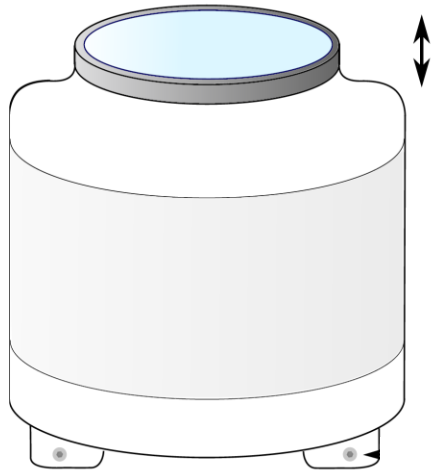
Comment tester les limites d'un système modèle ou d'une analogie ? L'exemple des marcheurs.



2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Surface libre vibrée verticalement :
Modulation de la gravité

$$g(t) = g [1 + \Gamma \cos(\Omega t)]$$



Ondes de Faraday : Ondes stationnaires de fréquence
moitié du forçage

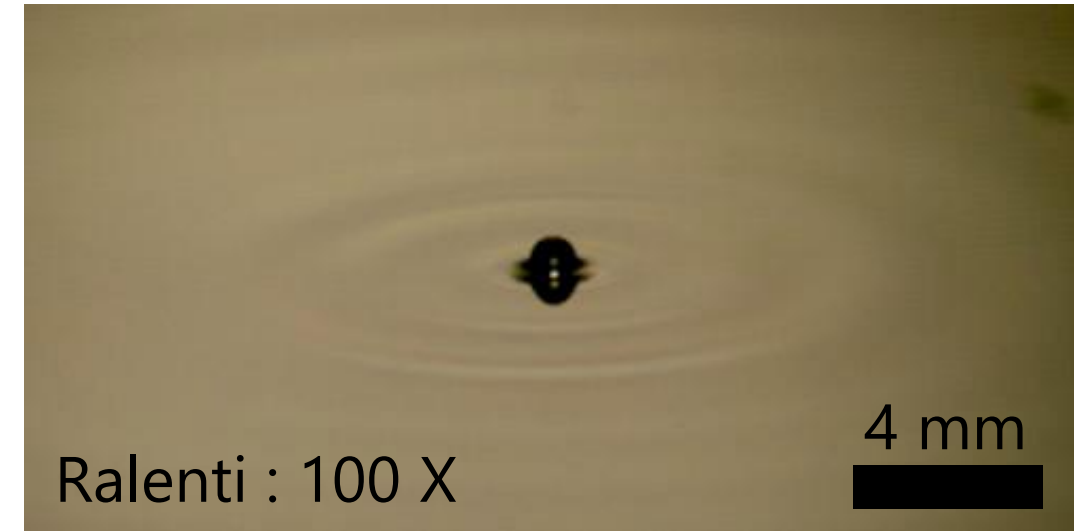
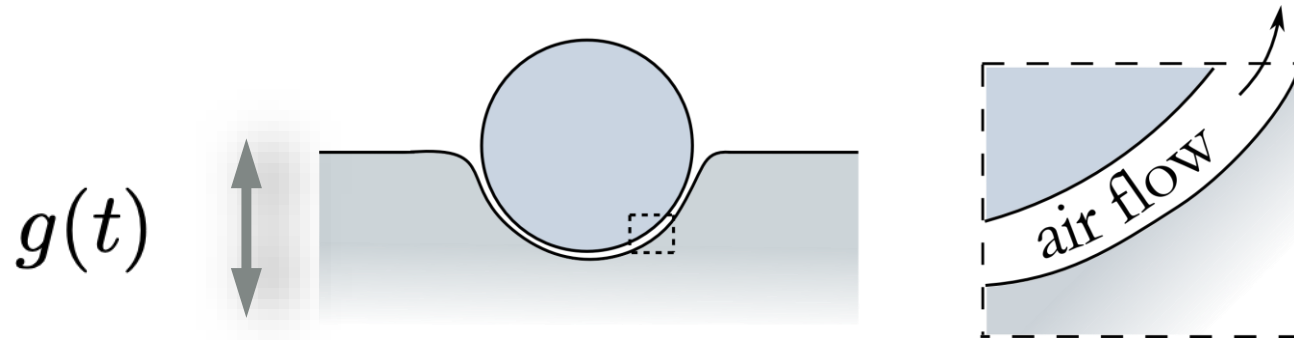


- **Pourquoi un système modèle est-il intéressant ?**

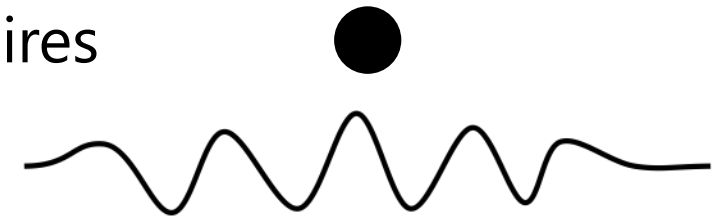
Car on ne peut pas observer la dualité onde corpuscule avec des ondes de probabilité !

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Coalescence empêchée pour les gouttes par renouvellement du film d'air



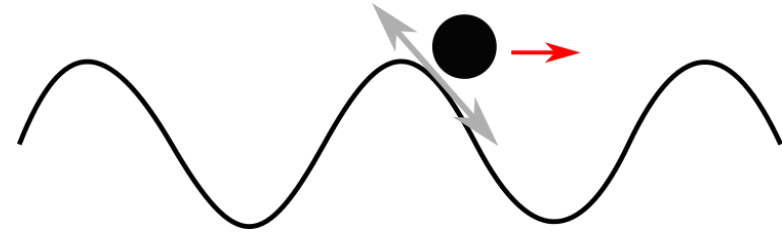
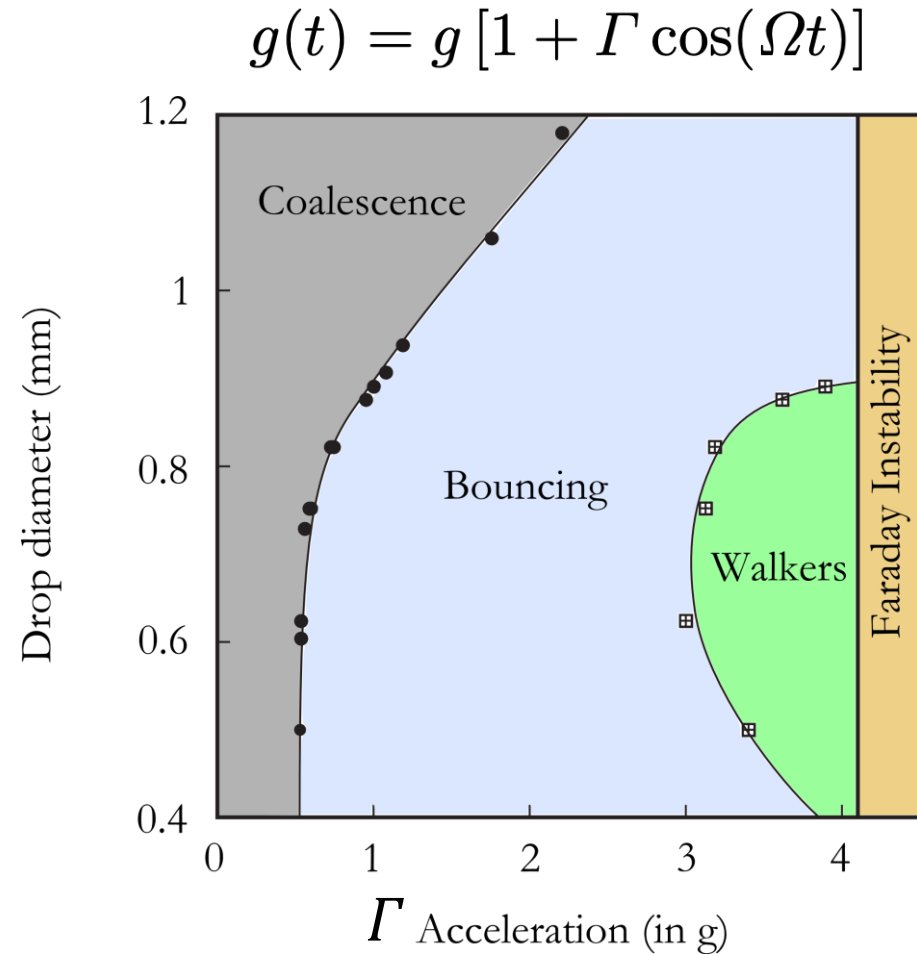
Une goutte rebondissante émet des ondes capillaires



- **Pourquoi un système modèle est-il intéressant ?**

Car on ne peut pas observer la dualité onde corpuscule avec des ondes de probabilité !

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?



- **Pourquoi un système modèle est-il intéressant ?**

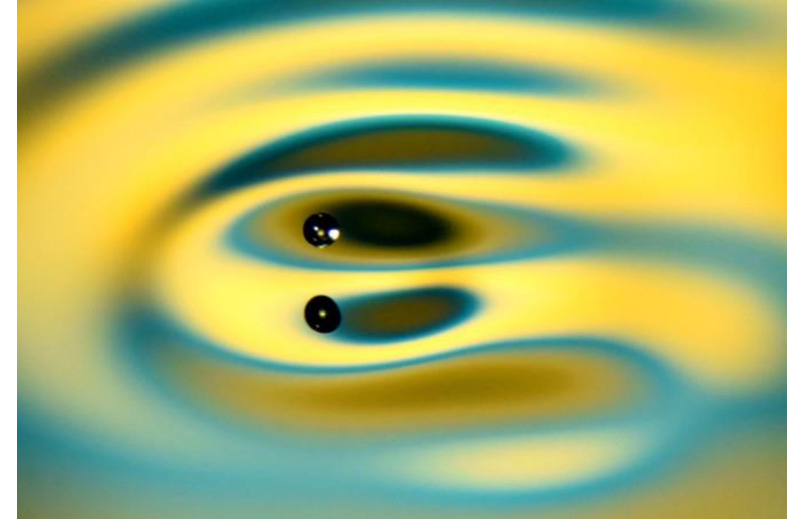
Car on ne peut pas observer la dualité onde corpuscule avec des ondes de probabilité !

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?



« En résumé, le point matériel nous apparaît maintenant comme un système d'ondes stationnaires entourant un point source central. »

L. de Broglie (1926)



- **Pourquoi un système modèle est-il intéressant ?**

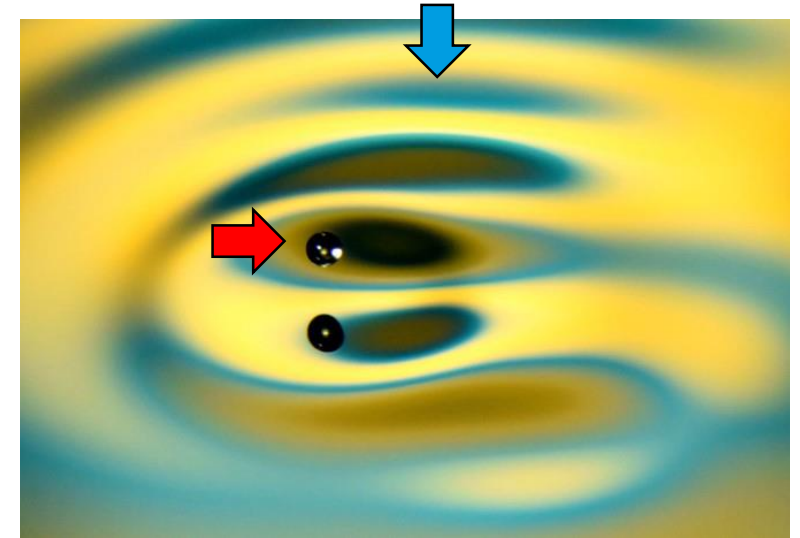
Car on ne peut pas observer la dualité onde corpuscule avec des ondes de probabilité !

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?



« En résumé, le point matériel nous apparaît maintenant comme un **système d'ondes stationnaires** entourant **un point source central**. »

L. de Broglie (1926)



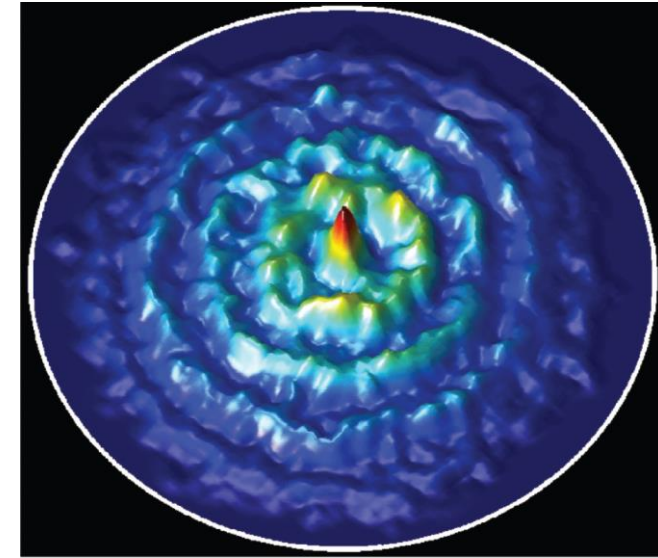
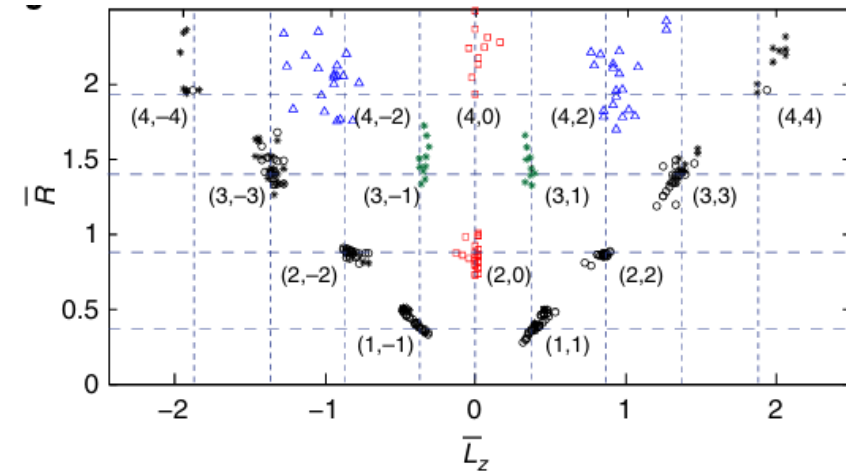
- **Pourquoi un système modèle est-il intéressant ?**

Car on ne peut pas observer la dualité onde corpuscule avec des ondes de probabilité !

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Des similarités troublantes :

- Quantification des orbites d'un marcheur dans un puits de potentiel
- Quantification des rayon orbitaux
- Probabilité de présence dans une cavité
- Effet tunnel imprédictible

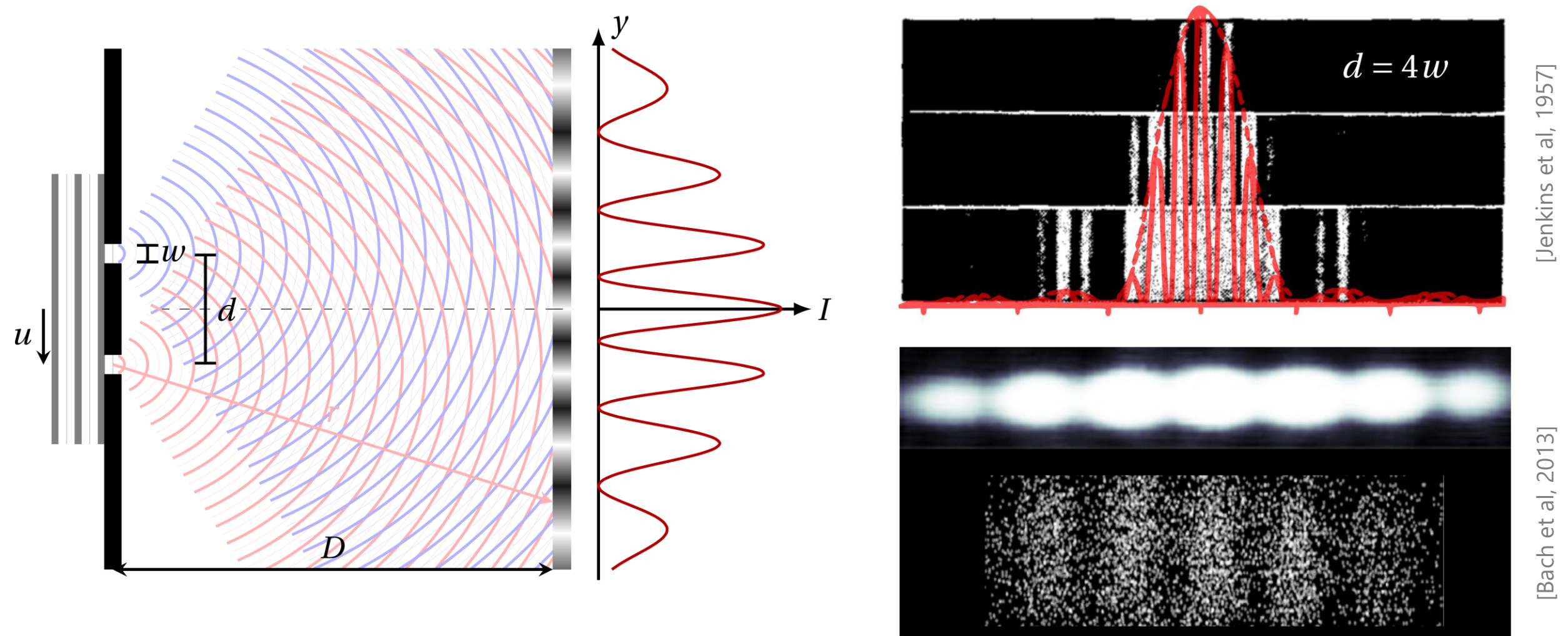


• Des similarités valent-elles analogie ?

L'expérience décisive est celle de la **diffraction à deux fentes**.
Peut-on la reproduire avec des marcheurs ?

[Couder et al., 2005]
[Eddi, et al, 2012]
[Perrard et al, 2014]
[Harris et al, 2014]

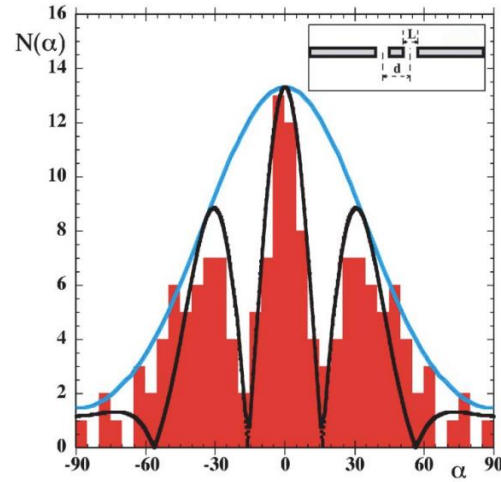
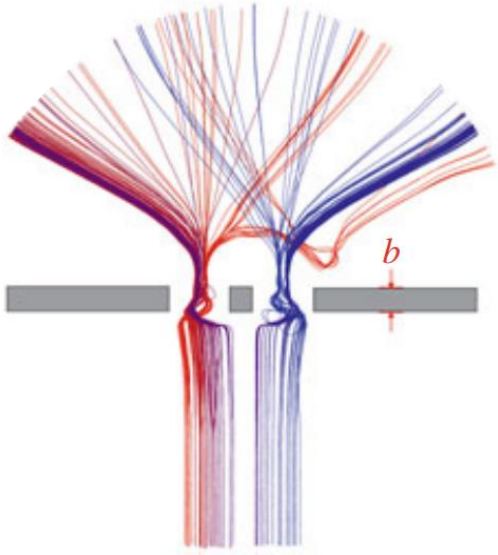
2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?



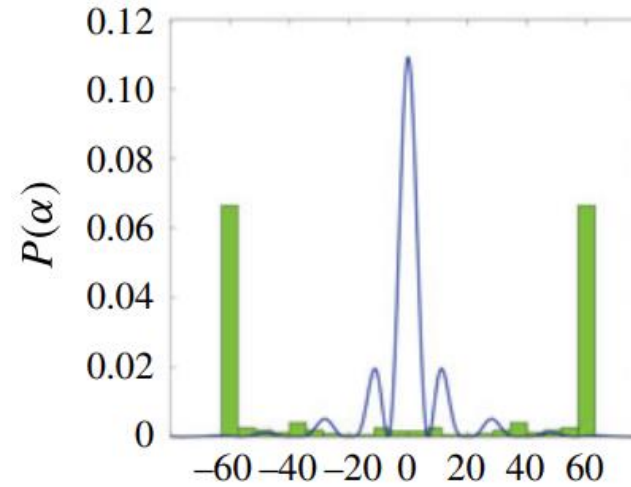
- **Des similarités valent-elles analogie ?**

L'expérience décisive est celle de la **diffraction à deux fentes**.
Peut-on la reproduire avec des marcheurs ?

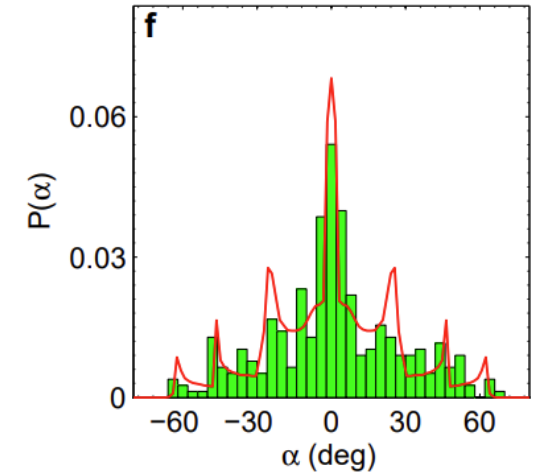
2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?



[Couder & Fort, 2006]



[Pucci *et al.*, 2018]



[Ellegard & Levinsen, 2024]

Critiques : Pas assez de points expérimentaux, symétrisation des données, courants d'air, température du bain, illumination, expérience très sensible aux fluctuations extérieures.

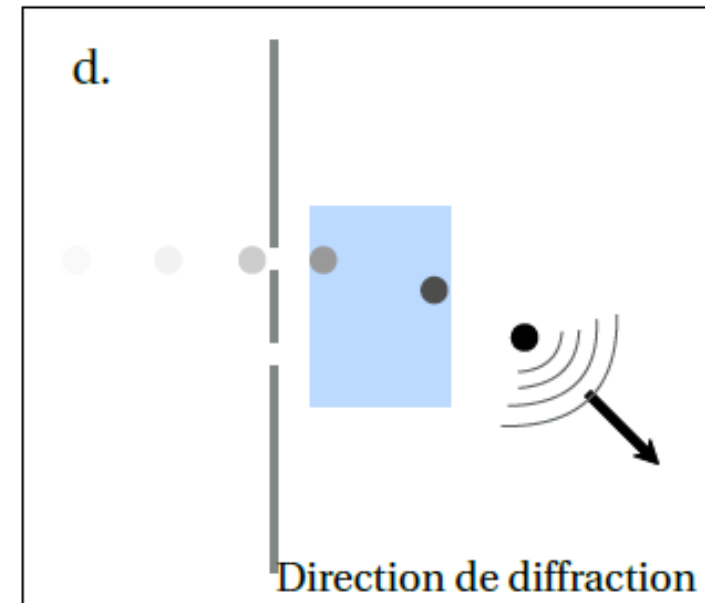
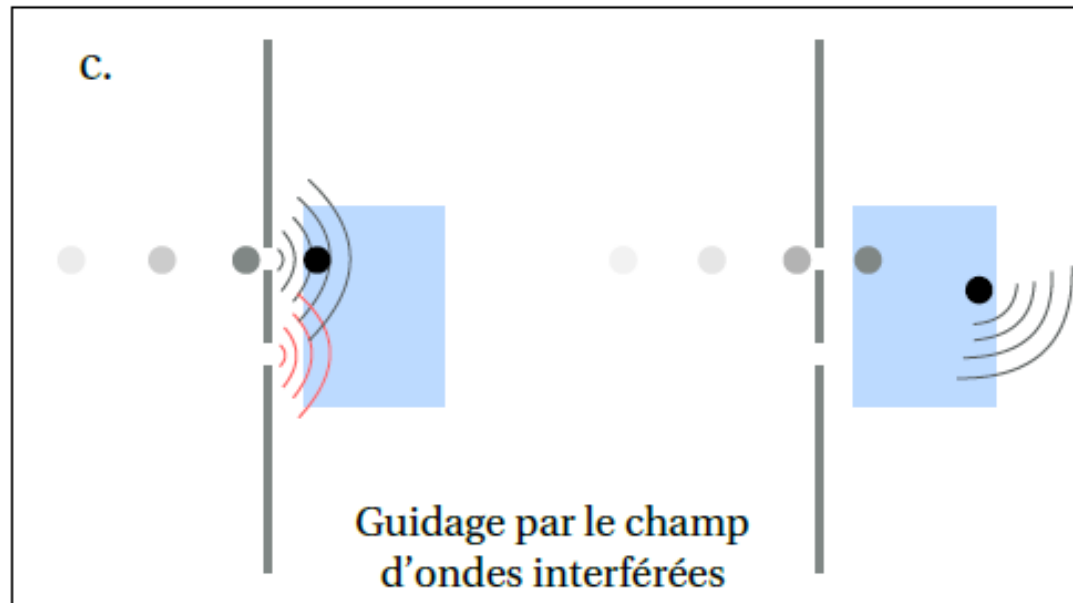
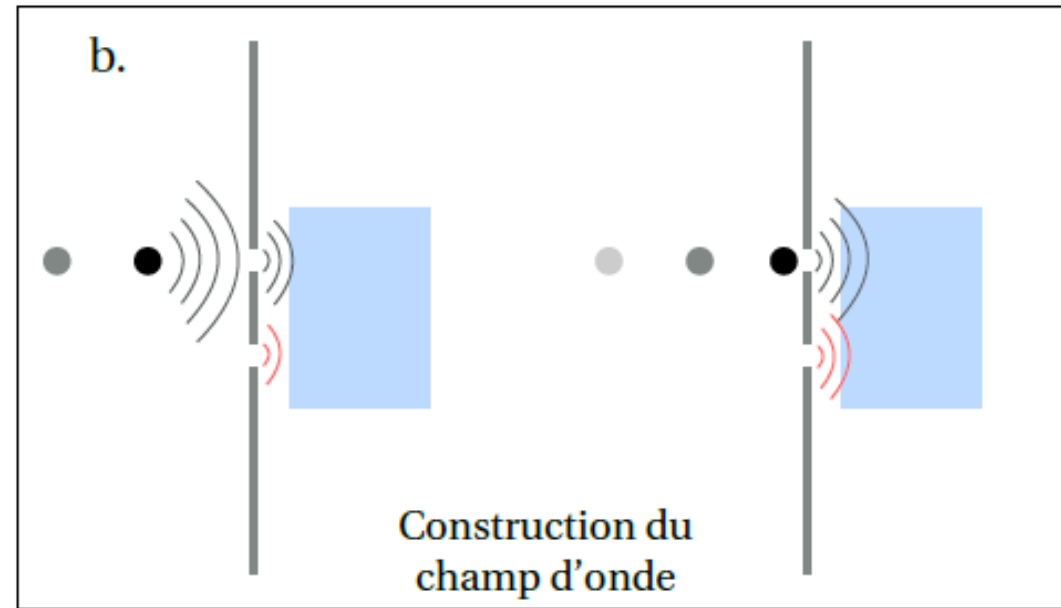
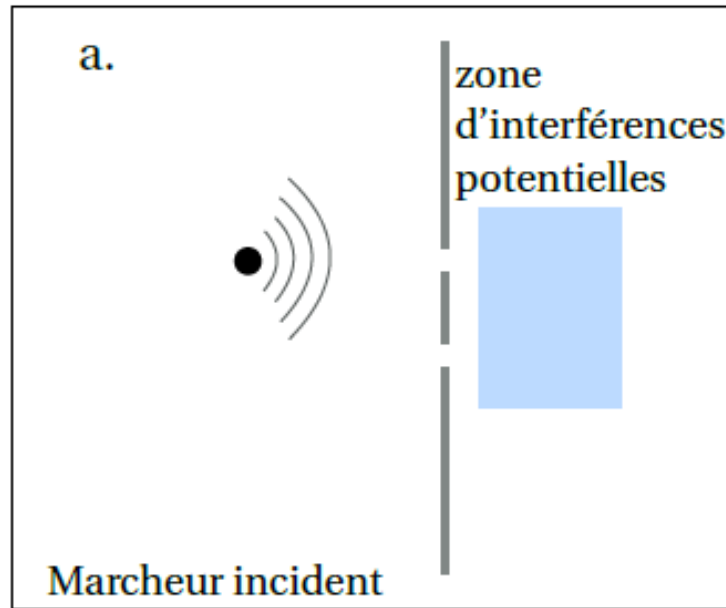
Attention : Les modèles numériques *suivent* les données expérimentales.

- **Des similarités valent-elles analogie ?**

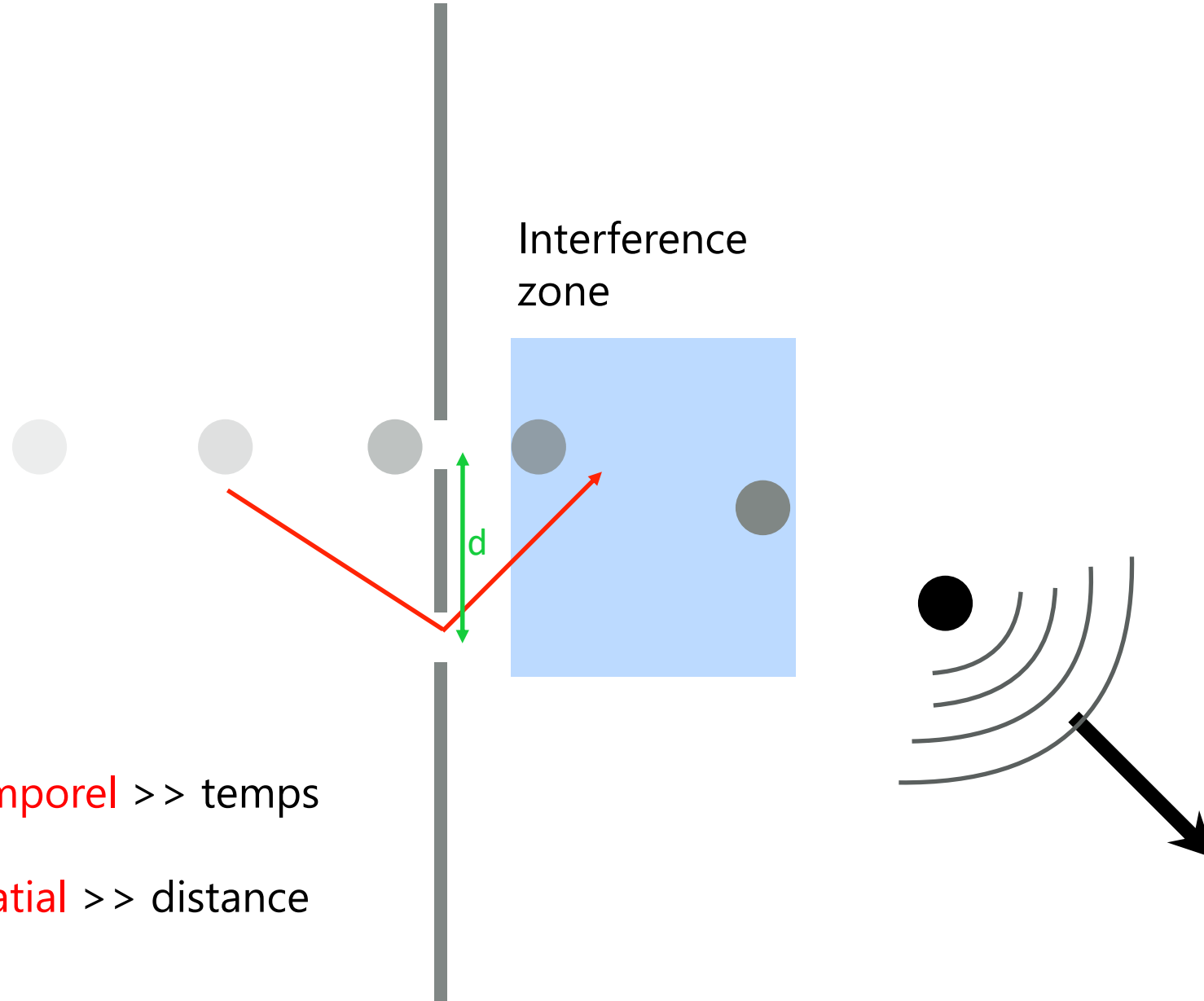
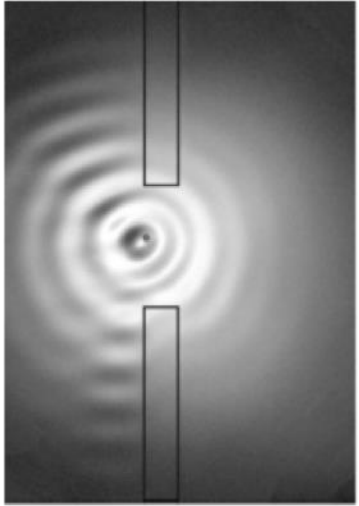
L'expérience décisive est celle de la **diffraction à deux fentes**.

Peut-on la reproduire avec des marcheurs ?

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

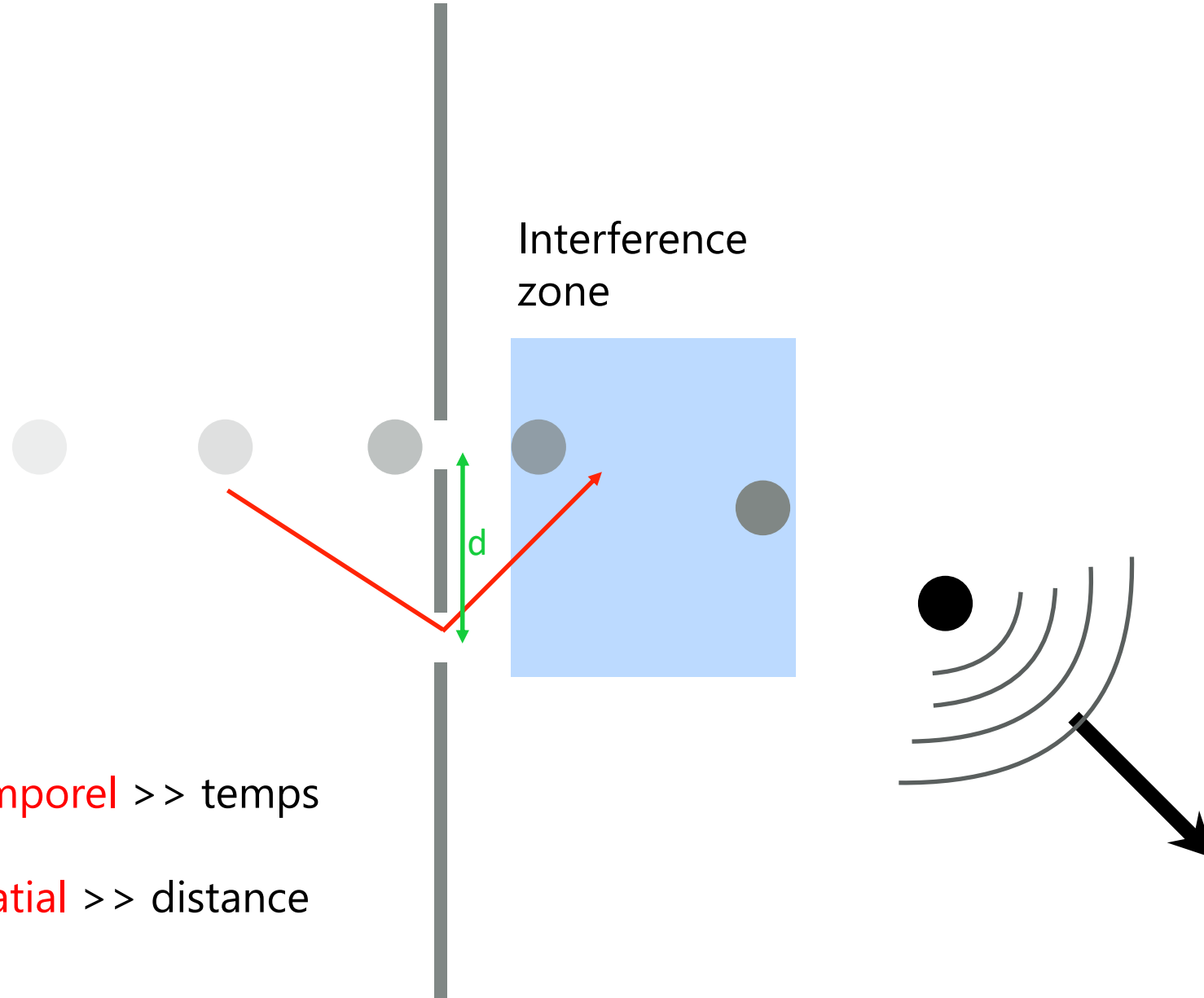
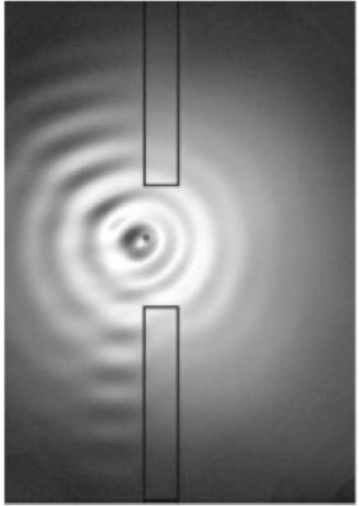


2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?



- **Amortissement temporel** $\gg$ temps de franchissement.
- **Amortissement spatial** $\gg$ distance inter-fente

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?



- Amortissement temporel $\gg$ temps de franchissement.
- Amortissement spatial $\gg$ distance inter-fentes

➡ **Nécessité de bien connaître les ondes. Notamment connaître l'effet de la viscosité.**

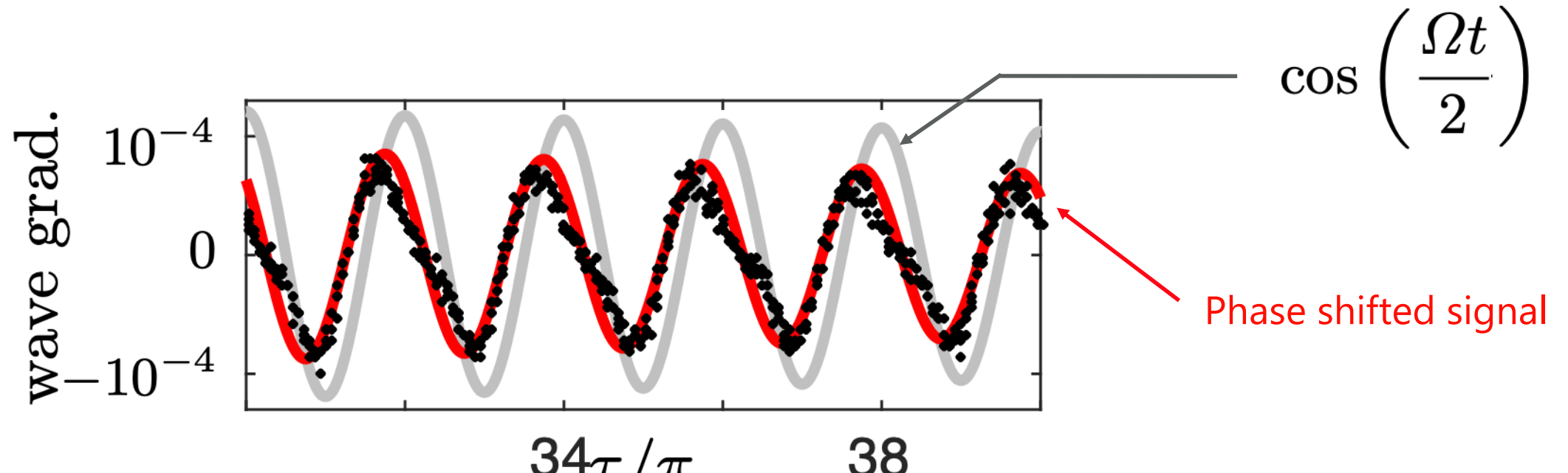
2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

(1) Impact unique :

$$\zeta_1(r, t) \propto \sqrt{\frac{2\pi}{D\Omega(t-t_i)}} J_0(k_F r) \cos\left(\Omega t + \frac{\pi}{4}\right) \times \exp\left[\frac{t-t_i}{M_e T_F} - \frac{r^2}{2D(t-t_i)}\right]$$

Profil de Bessel time modulé
par un cosinus

Amortissement temporel et
couplé spatio-temporel (diffusif)



2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Champ d'onde : Somme des ondes générées à tous les rebonds

$$\zeta(r, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{[\tau/2\pi]} \zeta_1(\|\vec{r} - \vec{r}_n\|, \tau - 2n\pi)$$

Position du n^{ème} impact Temps du n^{ème} impact

Champ d'onde total autour d'un marcheur :

$$\zeta_w(r, t) \propto J_0 \left(k_F \left| r + \frac{r}{\sqrt{v^2 + 2 \frac{4(g+3\sigma k_0^2/\rho)^2}{\omega^4 \mathcal{M}}}} v \right| \right) e^{-r/l(\theta)}$$

Amortissement
spatial exponentiel

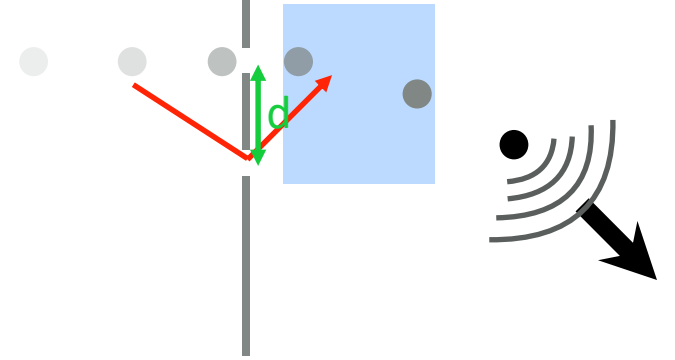
Extension
caractéristique du
champ d'onde

$$l(\theta) = \frac{4(g + 3\sigma k_0^2/\rho)^2}{8\omega^3 v k_0^2 \left(v \cos \theta + \sqrt{v^2 + 2 \frac{4(g+3\sigma k_0^2/\rho)^2}{\omega^4 \mathcal{M}}} \right)}$$

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Conditions expérimentales pour observer des interférences :

- Extension spatiale $l \gg d$
- Extension temporelle $M_e T_F \gg d/v$
- Pas d'effet de bord $R/l \gg 1$



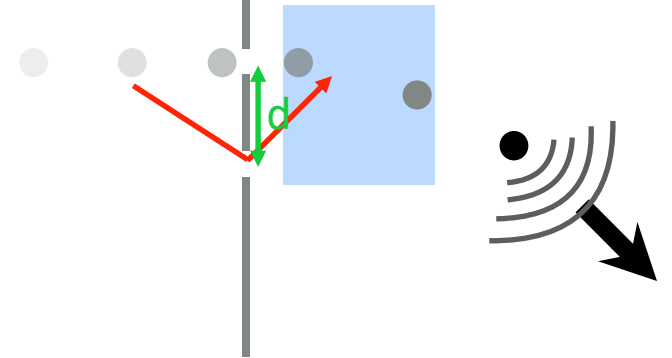
Experiment	V_w (mm s ⁻¹)	$\sqrt{2}d$ (mm)	$\mathcal{M}$	$MeT_F V_w / \sqrt{2}d$	$l / \sqrt{2}d$	R/l
Couder & Fort (2006)	18.9	20.2	5–20	0.12–0.5	0.8	2.5–4.7
Andersen <i>et al.</i> (2015)	15	14	21	0.5	1.17	2.82
Pucci <i>et al.</i> (2018)	12	28.3	500	5.3	2.18	1.15

TABLE 2. Experimental conditions used in three previous double-slit experiments with walkers (Couder & Fort 2006; Andersen *et al.* 2015; Pucci *et al.* 2018). Walking speed V_w , path length of the waves $\sqrt{2}d$, distance to threshold $\mathcal{M}$, normalised damping time $MeT_F V_w / \sqrt{2}d$, normalised damping length $l / \sqrt{2}d$ and normalised distance to boundaries R/l .

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Conditions expérimentales pour observer des interférences :

- Extension spatiale $l \gg d$
- Extension temporelle $M_e T_F \gg d/v$
- Pas d'effet de bord $R/l \gg 1$



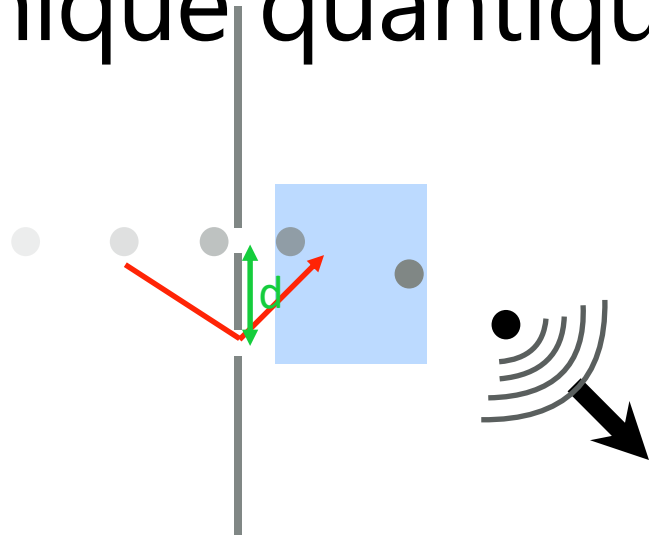
Experiment	V (mm/s)	$\sqrt{2}d$ (mm)	$\gamma_F/(\gamma_F - \gamma)$	$MeT_F V_w / \sqrt{2}d$	$l/\sqrt{2}d$	R/l
Couder & Fort [1, 34]	19	20.2	5-20	0.12-0.5	0.8	2.5-4.7
Andersen <i>et al.</i> [2]	15	14.1	21	0.5	1.17	2.82
Pucci <i>et al.</i> [4]	6.8	28.3	500	3.3	2.6	1.08
7.3 mm double-slit Fig. 12	8.3	16.9	250	3.1	3.2	1.67
7.3 mm double-slit Fig. 13	11.0	16.9	1000	16.3	4.5	1.18
5 mm double-slit Fig. 14	11.1	13.7	1000	20.3	5.6	1.18

TABLE I. Overview of experimental conditions used in previous experiments Ref. [34] compared with those of the present experiment on double-slit barriers. V_w is the droplet velocity, d the distance between slit centers, and R is the radius of the deep section of the container. The path length of the waves $\sqrt{2}d$, the normalized damping time $MeT_F V_w / \sqrt{2}d$, and the normalized damping length $l/\sqrt{2}d$ are calculated using the theory of Tadrist *et al.* [34].

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Conditions expérimentales pour observer des interférences :

- Extension spatiale $l \gg d$
- Extension temporelle $M_e T_F \gg d/v$
- Pas d'effet de bord $R/l \gg 1$



Experiment	L mm	V_w (mm/s)	$\sqrt{2}d$ (mm)	$\gamma_F/(\gamma_F - \gamma)$	$M_e T_F V_w / \sqrt{2}d$	$l(0)/\sqrt{2}d$	$l(90)/\sqrt{2}d$	$R/l(0)$
Couder and Fort [2]	7.6	17.4	20.2	5–20	0.08–0.3	0.2–0.4	0.3–0.5	9–4
Andersen <i>et al.</i> [3]	5	15	14.1	21	0.5	0.9	1.0	7.3
Pucci <i>et al.</i> [6]	14.7	6.8	28.3	500	2.3	1.7	2.35	1.7
Ellegaard and Levinsen [7]	7.3	8.3	16.9	250	2.3	2.1	2.8	2.5
Ellegaard and Levinsen [7]	7.3	11.0	16.9	1000	12.5	2.5	4.3	2.2
Ellegaard and Levinsen [7]	5	11.1	13.7	1000	15.5	3.0	5.2	2.2
$b = 2$ mm barrier	5.2	9.8	14.0	500	6.7	2.8	4.4	2.3
$b = 2$ mm, corrected	5.2	9.8	14.0	500	5.4	1.0	3.1	6.0
$b = 0.5$ mm barrier	5.2	7.9	14.0	500	5.4	3.2	4.6	2.0
$b = 0.5$ mm, corrected	5.2	7.9	14.0	500	5.4	1.1	3.4	5.6

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

- Pas d'expérience compatible avec la mécanique quantique
- Pas d'expérience avec des conditions expérimentales très favorables
- Mauvaise connaissance des obstacles submergés
- Expériences sensibles et complexes à mettre en œuvre
 - Illumination,
 - Régulation de température,
 - Horizontalité du bain,
 - Génération de goutte,
 - Effets électrostatiques,
 - Interaction avec les obstacles,
 - Dissipation visqueuse

 **Conclusion plutôt en défaveur de l'analogie**

2.2 Un système modèle pour la mécanique quantique ?

Leçons de l'analogie entre particule quantique et marcheur :

1. Analogie => équations de base similaires entre deux systèmes
Ex : hydraulique / électricité ; tension de surface / membrane élastique
2. Ressemblance phénoménologique $\neq$ Analogie

Les marcheurs permettent :

1. D'investiguer la dualité onde corpuscule macroscopique
2. De mettre en évidence les spécificités quantiques

Les marcheurs ne permettent pas :

1. De reproduire certains phénomènes quantiques
2. De prédire des résultats quantiques nouveaux

Sommaire

Partie 1 : Cours scientifique, le physicien mécanicien

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

1. Qu'est-ce qu'un système modèle ?
2. Un système modèle pour la mécanique quantique ?
- 3. Les qualités du système modèle biomécanique**
4. Les dangers du système modèle biomécanique
5. Conclusion : les systèmes modèles biomécaniques

Partie 3 : Projet de recherche , actionneurs bioinspirés

2.3 Les qualités du système modèle biomécanique

Comment les plantes fanent-elles ?



+3 h
+10 °C



2.3 Les qualités du système modèle biomécanique



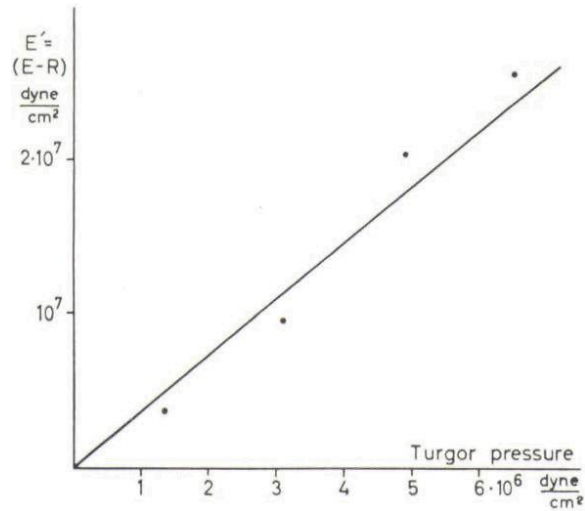
« Du pré au labo, les pétioles devenaient mous »



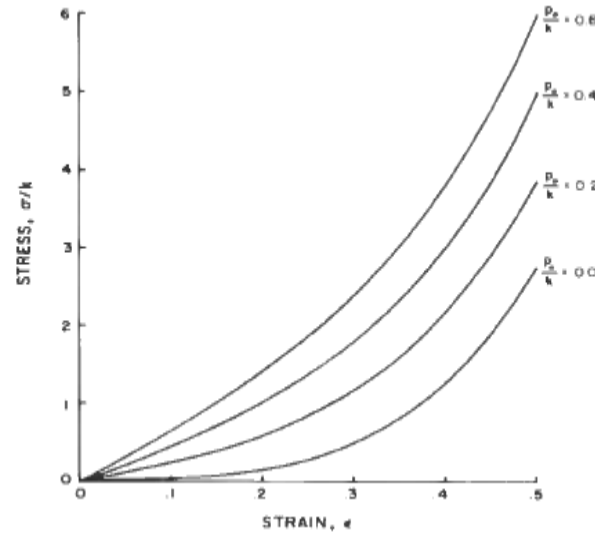
Protocole de mesure de rigidité des pétioles:

1. Prélever une feuille
2. Courir jusqu'au laboratoire (50 m)
3. Faire un test de raideur en flexion

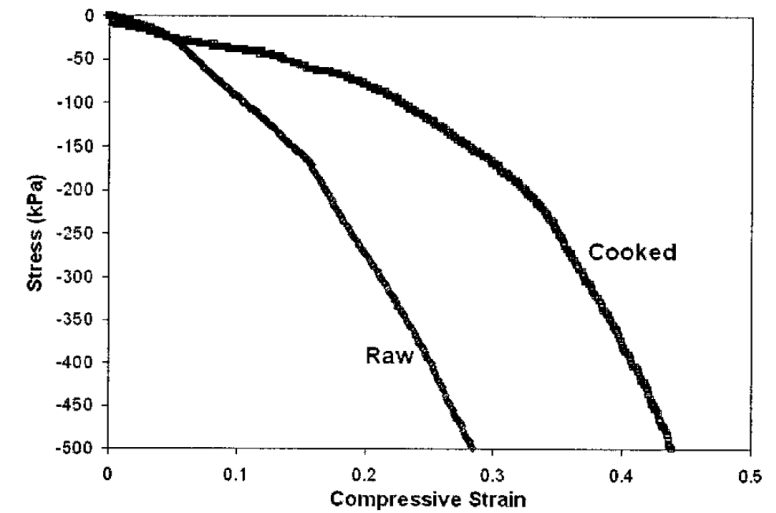
« Il existe une explication mécanique du raidissement sous pression de turgescence »



[Nilsson, 1958]



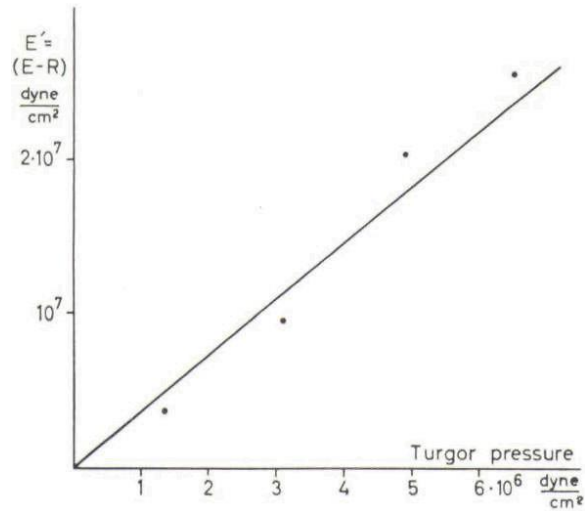
[Pitt, 1982]



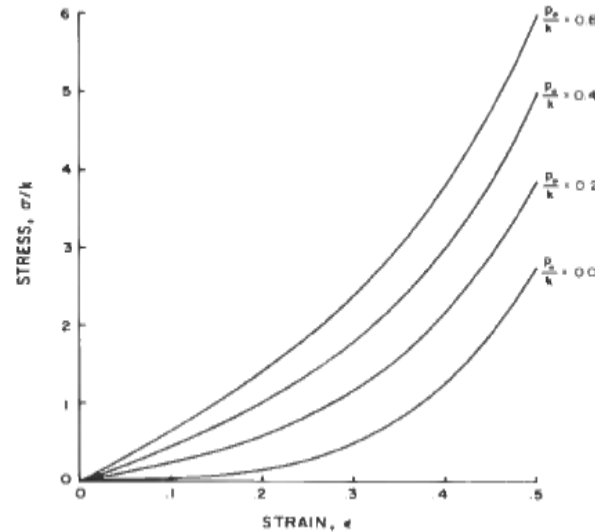
[Warner, 2000]



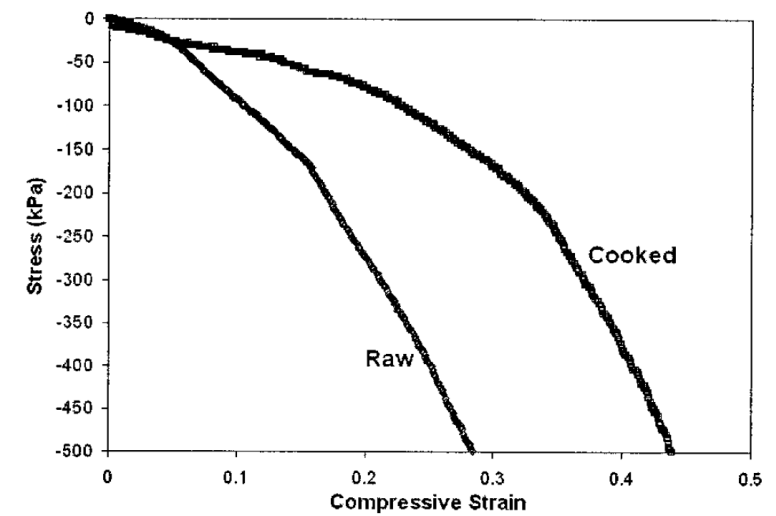
« Il existe une explication mécanique du raidissement sous pression de turgescence »



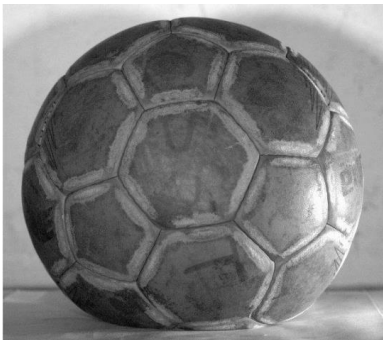
[Nilsson, 1958]



[Pitt, 1982]

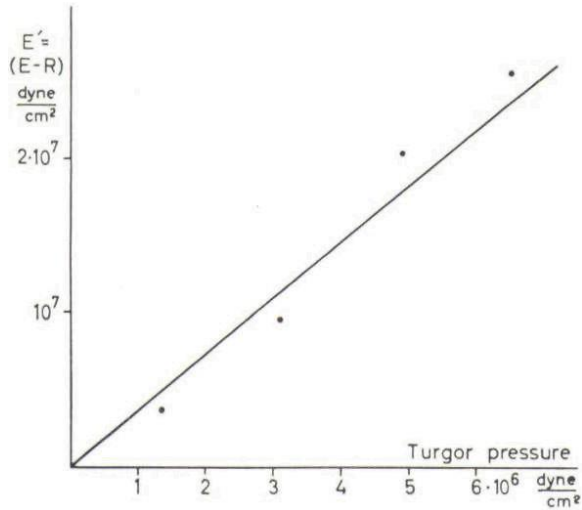


[Warner, 2000]



Intuition : comme les ballons de sport,
plus la pression est forte, plus le ballon est dur.

« Il existe une explication mécanique du raidissement sous pression de turgescence »

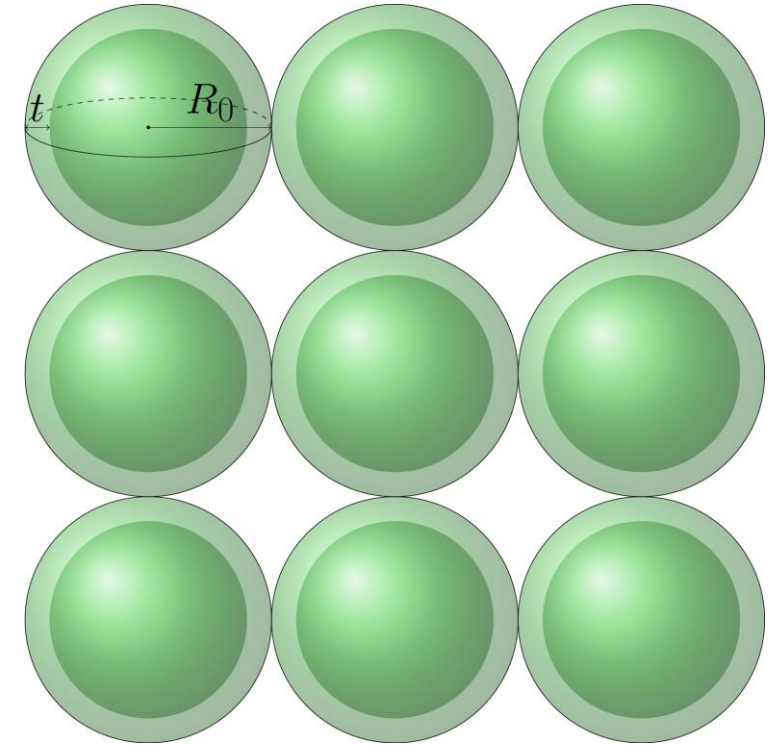


[Nilsson, 1958]



E : Module d'Young de la paroi
 ν : Coefficient de Poisson de la paroi
 t : Épaisseur de la paroi
 R_0 : Rayon des cellules
 P : Pression de turgescence

Y : Module d'Young apparent du tissu



$$Y = \underbrace{\frac{3(7-5\nu)}{10(1+\nu)(1-\nu)} \frac{t}{R_0}}_{\alpha} E + \underbrace{\left[1 + \frac{7-5\nu}{20(1+\nu)} \right]}_{\beta} 3P$$

$$\beta > 0$$

$$\alpha \propto \frac{t}{R_0}$$

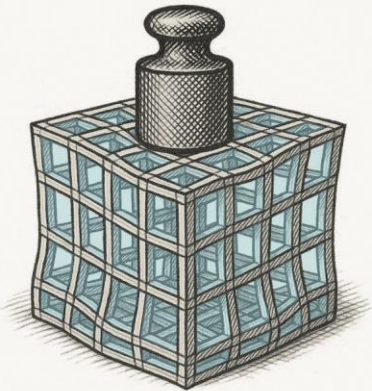
Turgides : les cellules sont mises en tension.

La raideur augmente avec la pression !

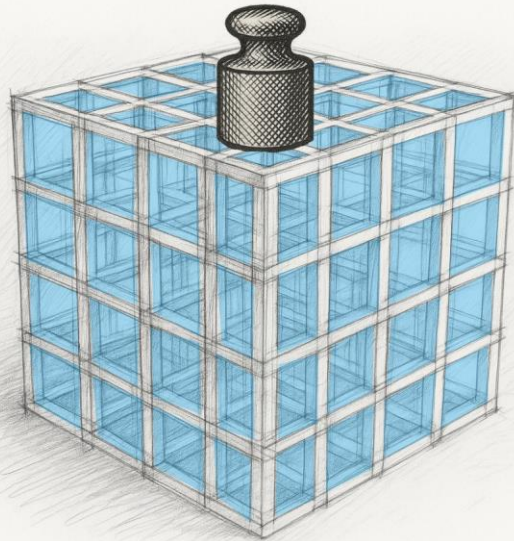
Présent

Biomimétisme d'une solution existante :

Deflated: soft



Inflated: rigid



a.



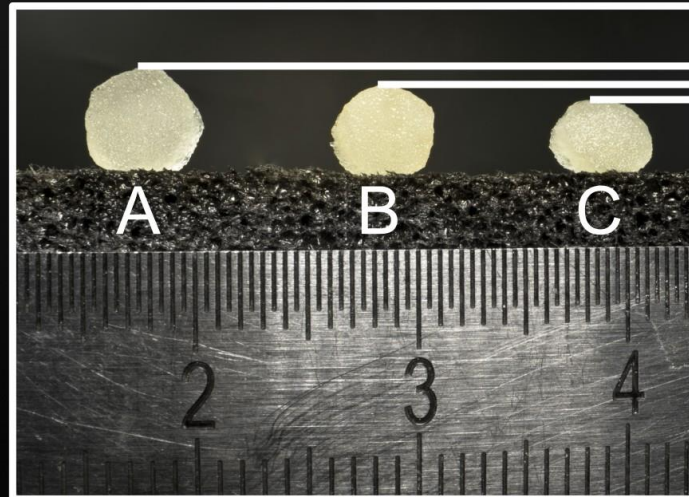
A $P = 1 \text{ MPa}$



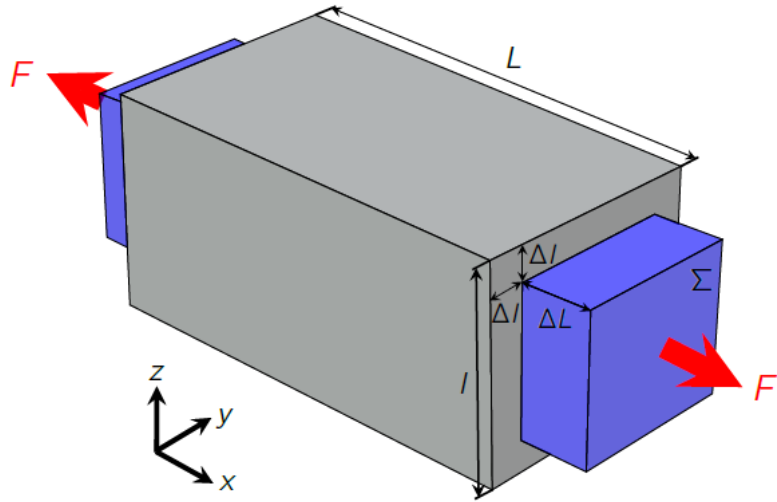
B Patate fraîche

$P = 0 \text{ MPa}$

C



Test de traction « hooke »

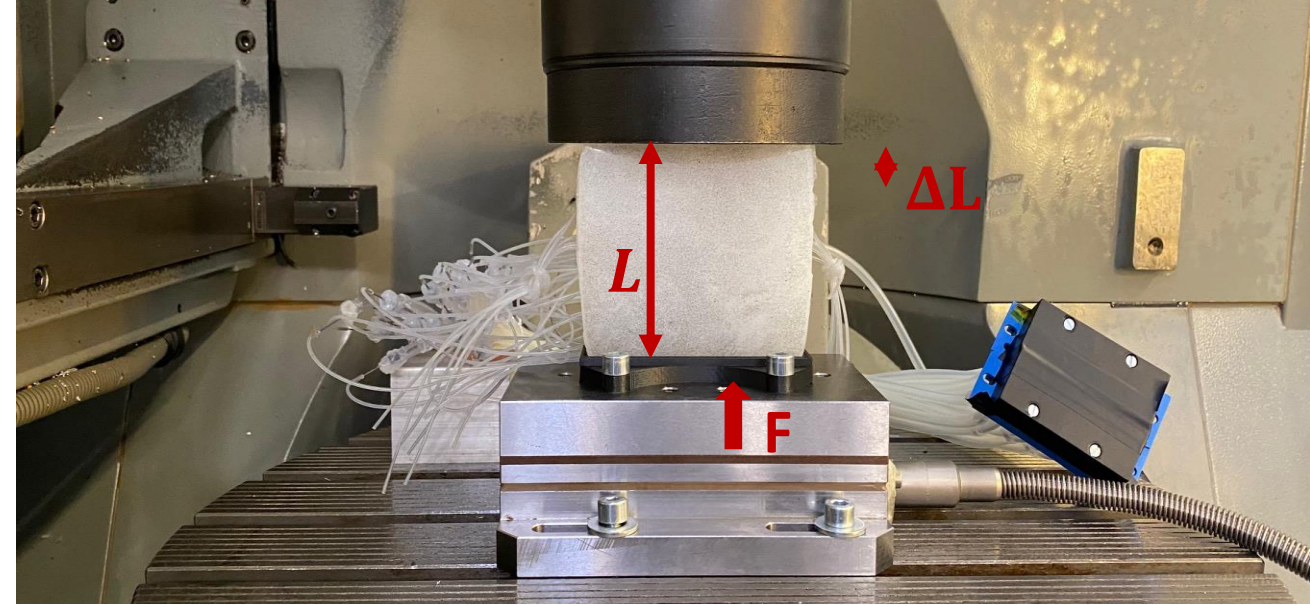


La traction avec une force F crée un déplacement ΔL

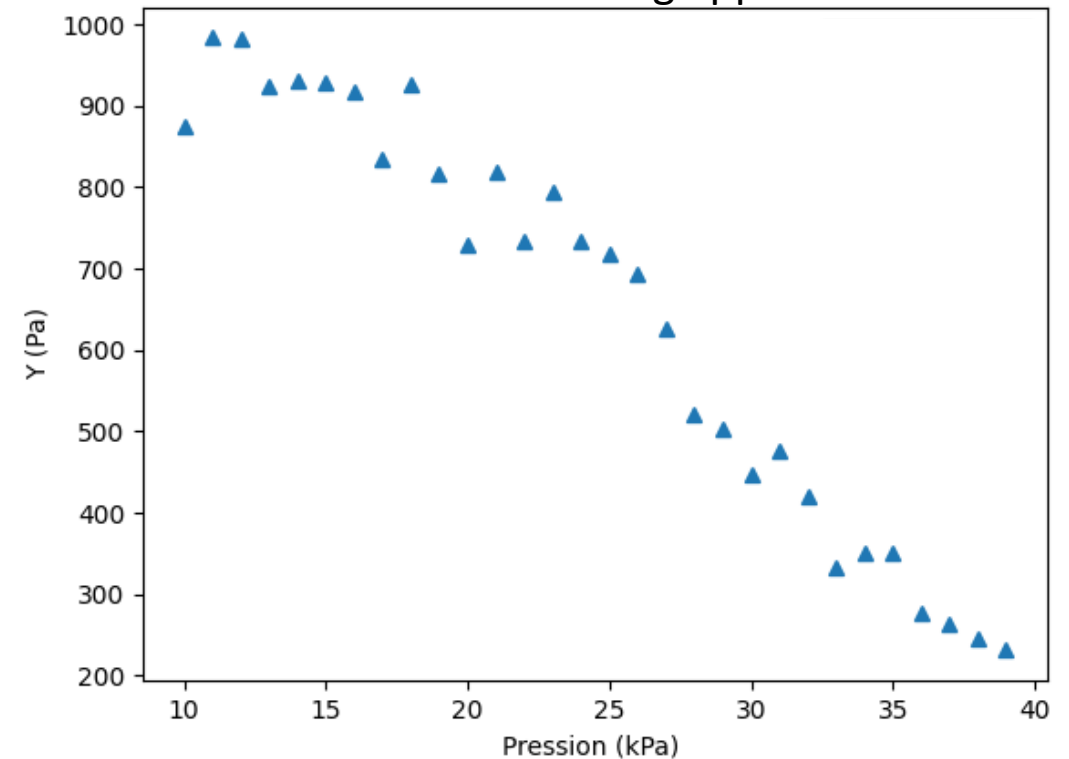
$$F = ES \frac{\Delta L}{L}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = -\nu \frac{\Delta L}{L}$$

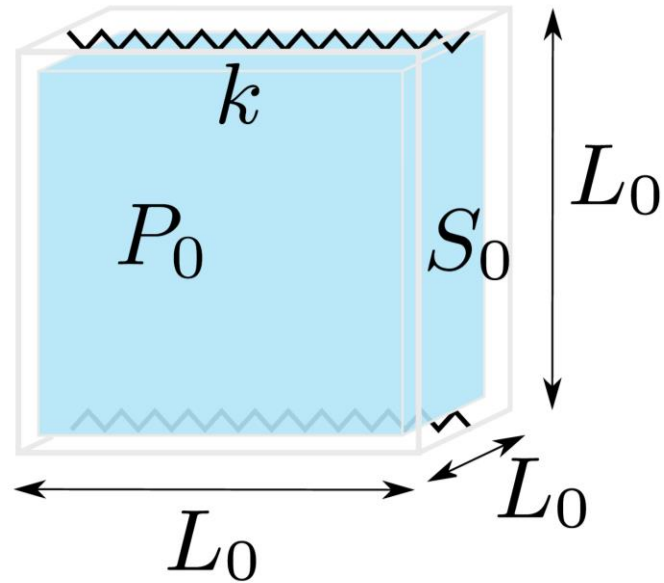
Les côtés se contractent d'un facteur appelé coefficient de Poisson



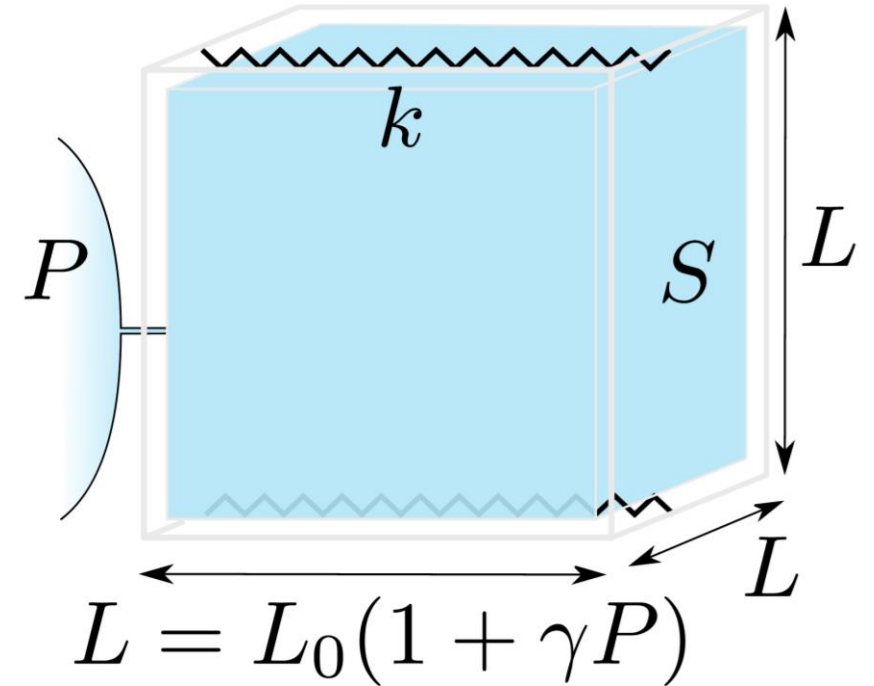
Module de Young apparent



Deflated
state



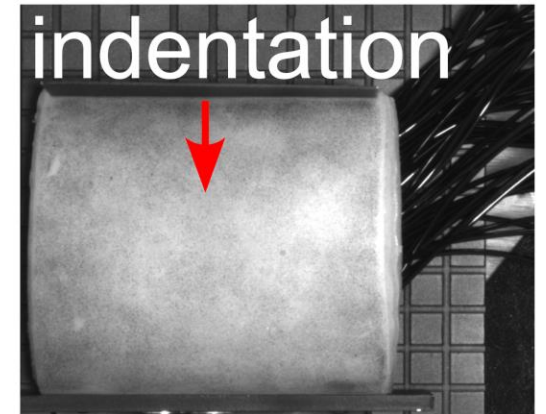
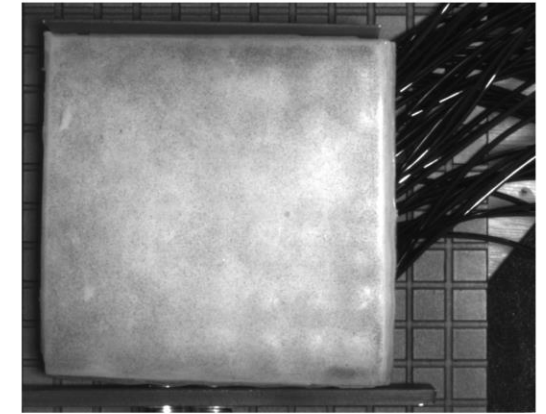
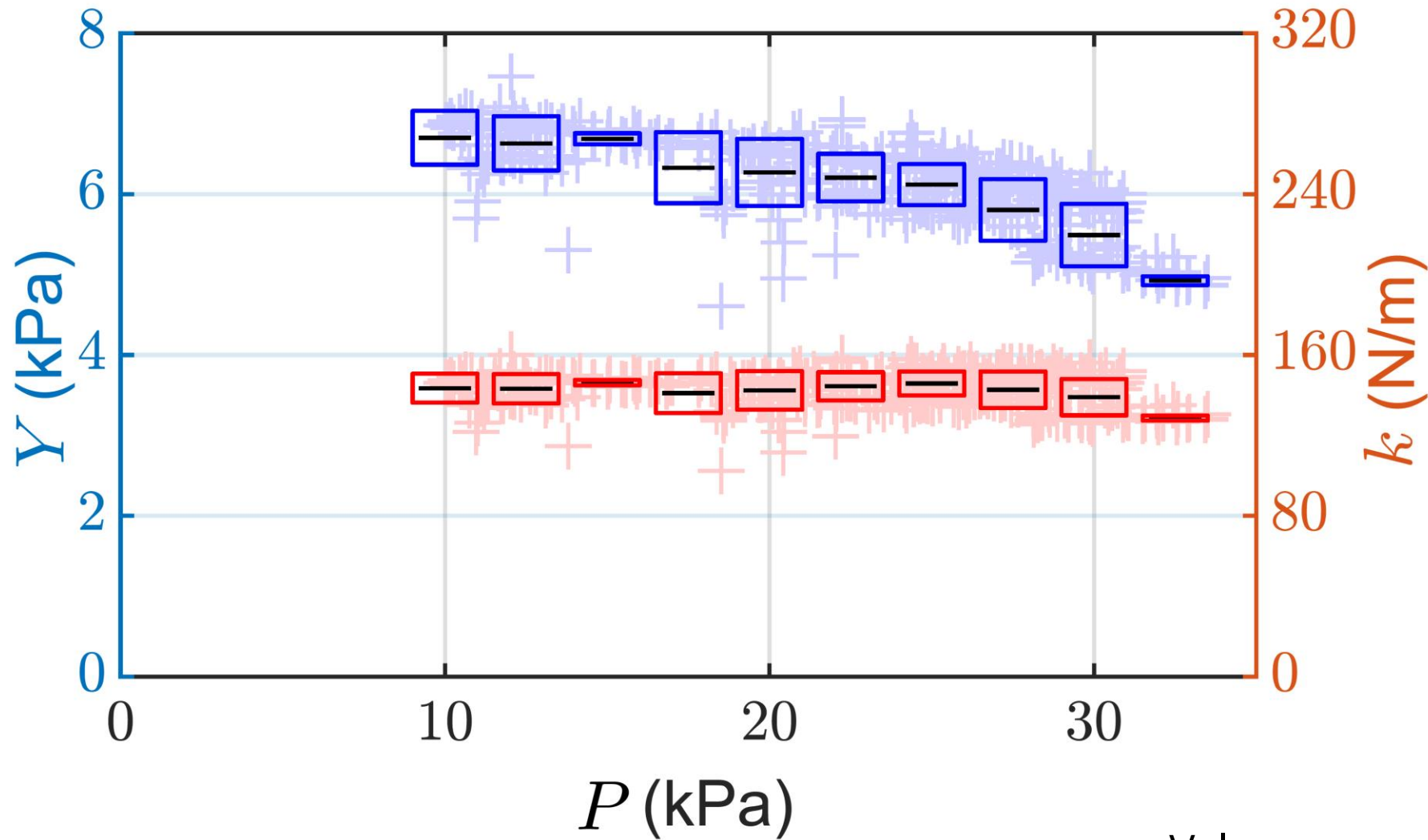
Inflated
state



$$F = kx \Rightarrow \underbrace{\frac{F}{L^2}}_{\sigma} = \frac{k}{L} \underbrace{\frac{x}{L}}_{\varepsilon} \Rightarrow Y = Y_0 (1 - \gamma P)$$

Volume augmente mais la raideur reste identique.

La mécanique linéaire prédit un effet « dilution » !



$$F = kx \Rightarrow \underbrace{\frac{F}{L^2}}_{\sigma} = \frac{k}{\underbrace{L}_Y} \underbrace{\frac{x}{L}}_{\varepsilon} \Rightarrow Y = Y_0 (1 - \gamma P)$$

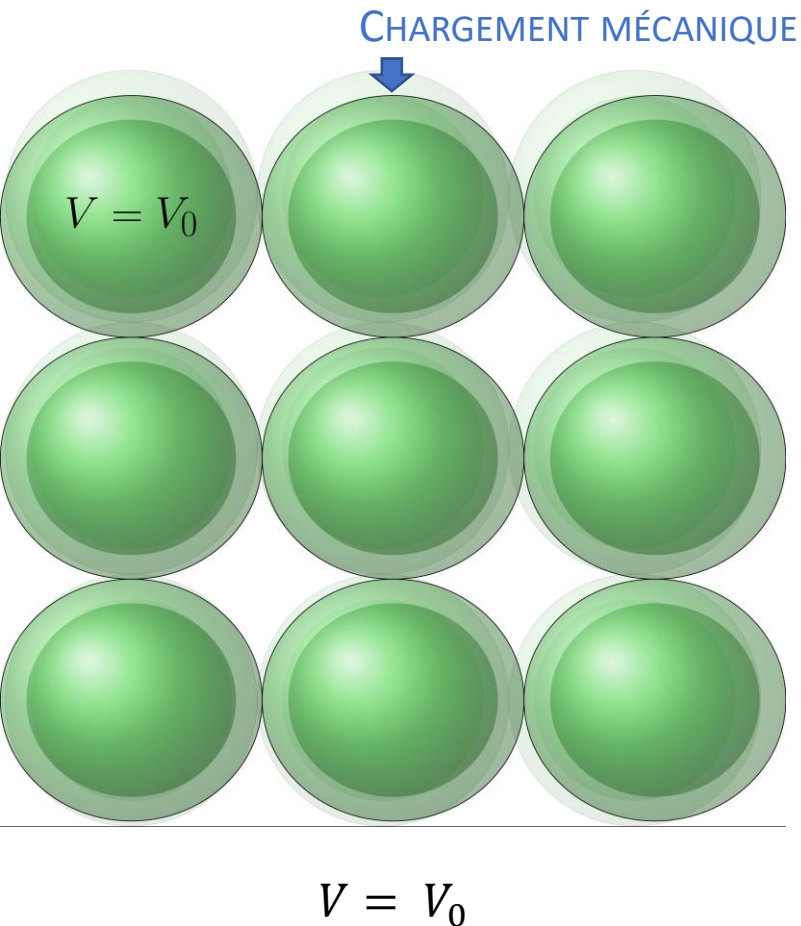
Volume augmente mais la raideur reste identique.

La mécanique linéaire prédit un effet « dilution » !

La thermodynamique est-elle la clef ?

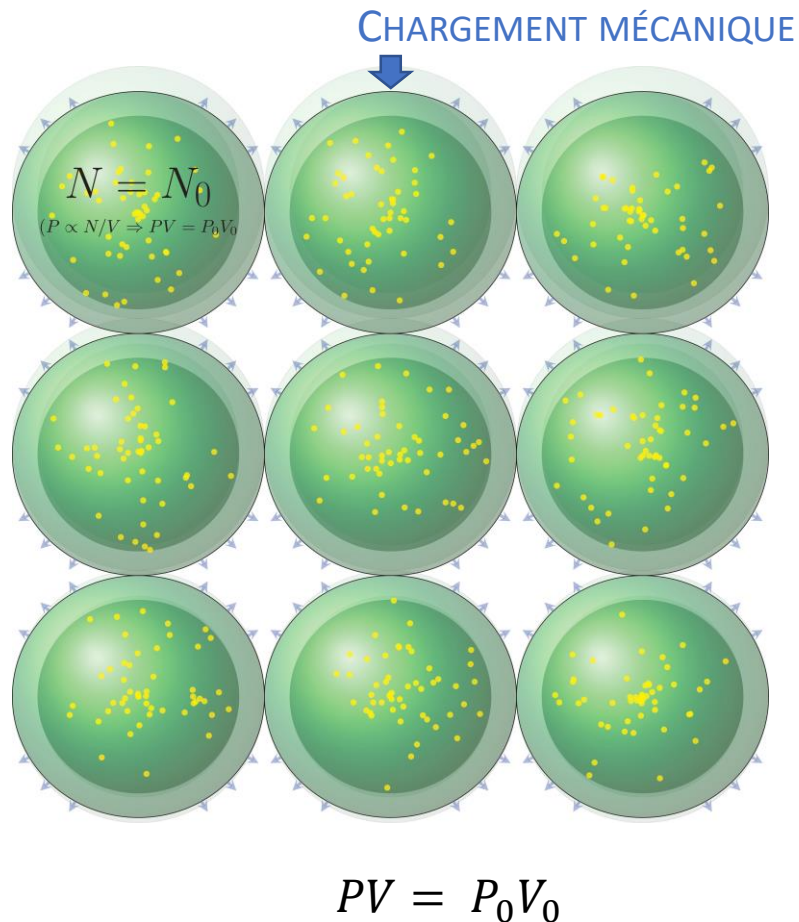
Cellules remplies d'eau

1. Transformation isochore



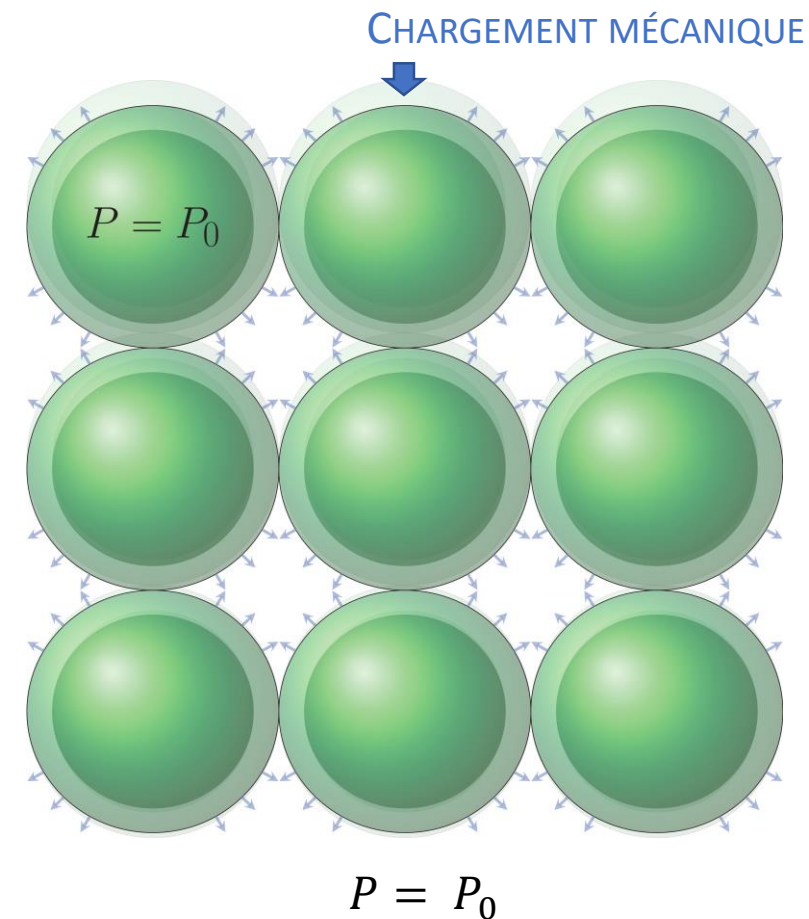
2. Transformation osmotique

★ Plantes



3. Transformation isobare

★ Expérience

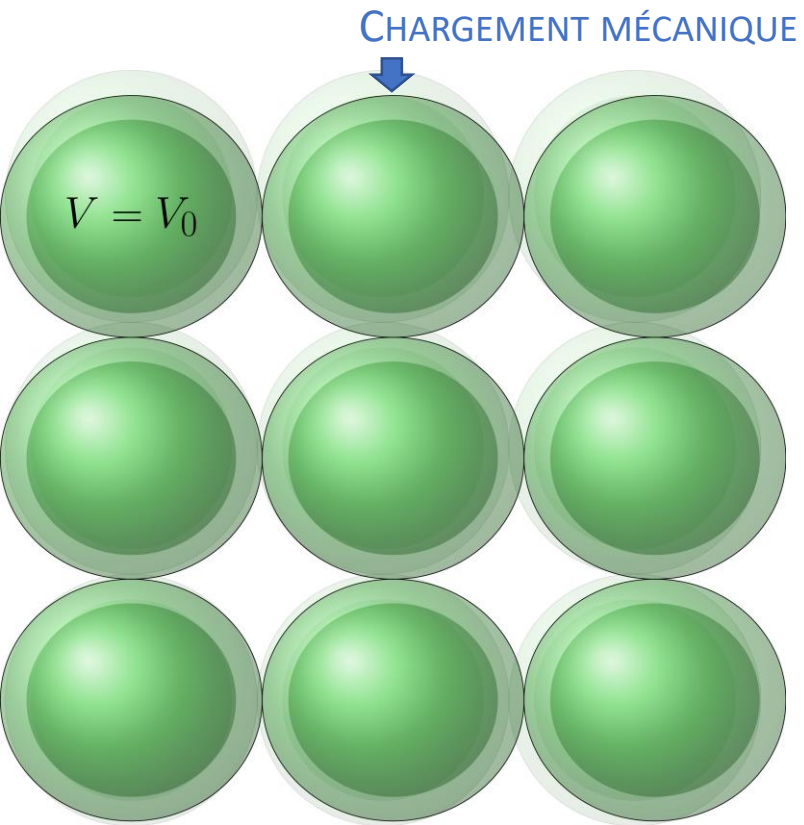


La thermodynamique est-elle la clef ?

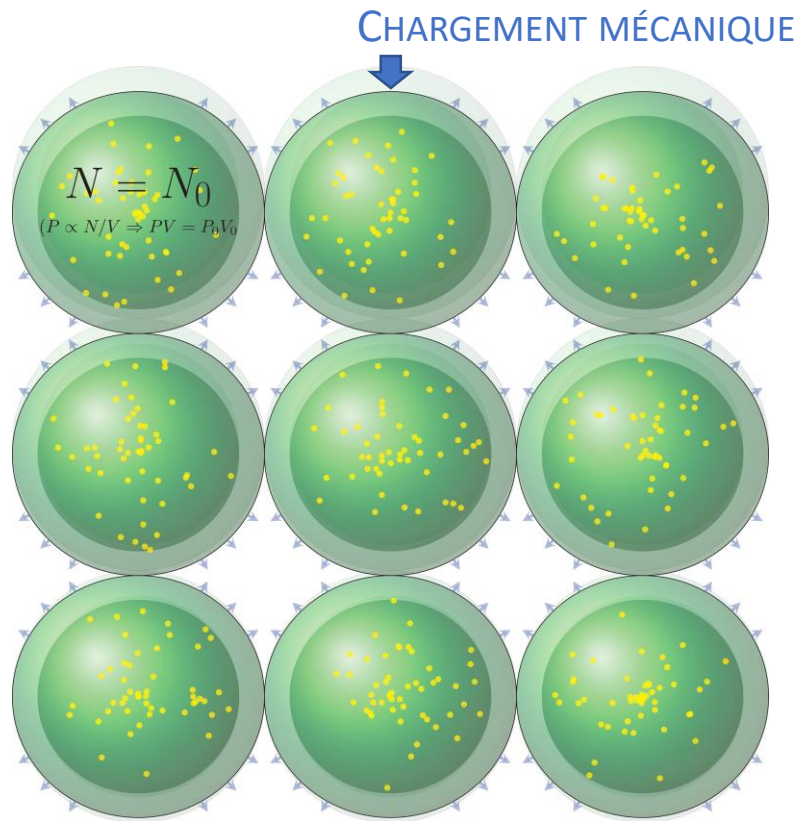
Cellules remplies d'air

1. Transformation adiabatique
2. Transformation isotherme
3. Transformation isobare

★ Ballons de sport (impact)

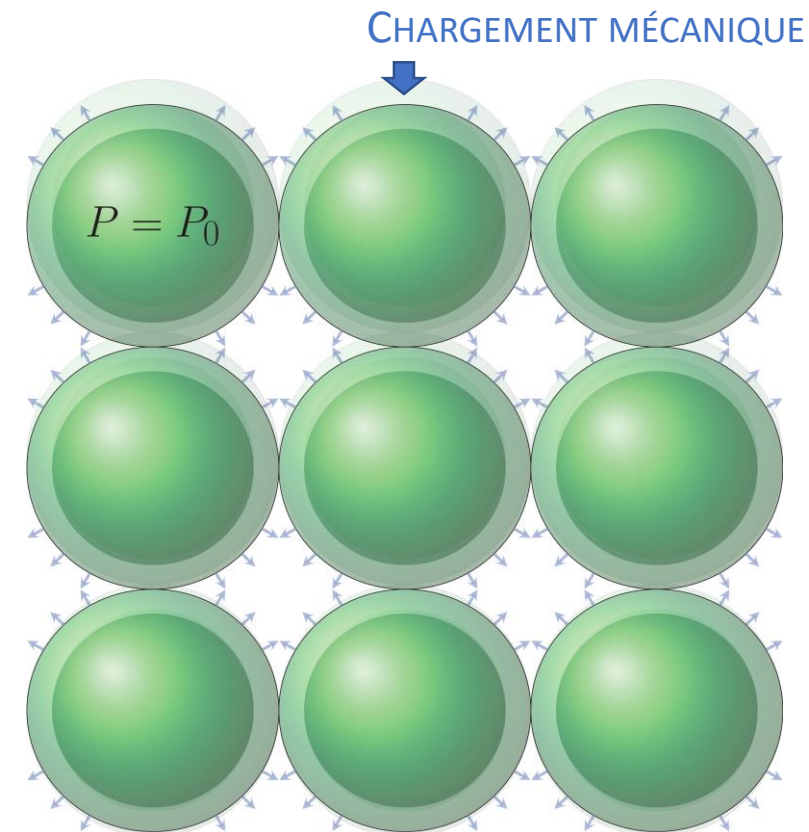


$$PV^\gamma = P_0V_0^\gamma$$



$$PV = P_0V_0$$

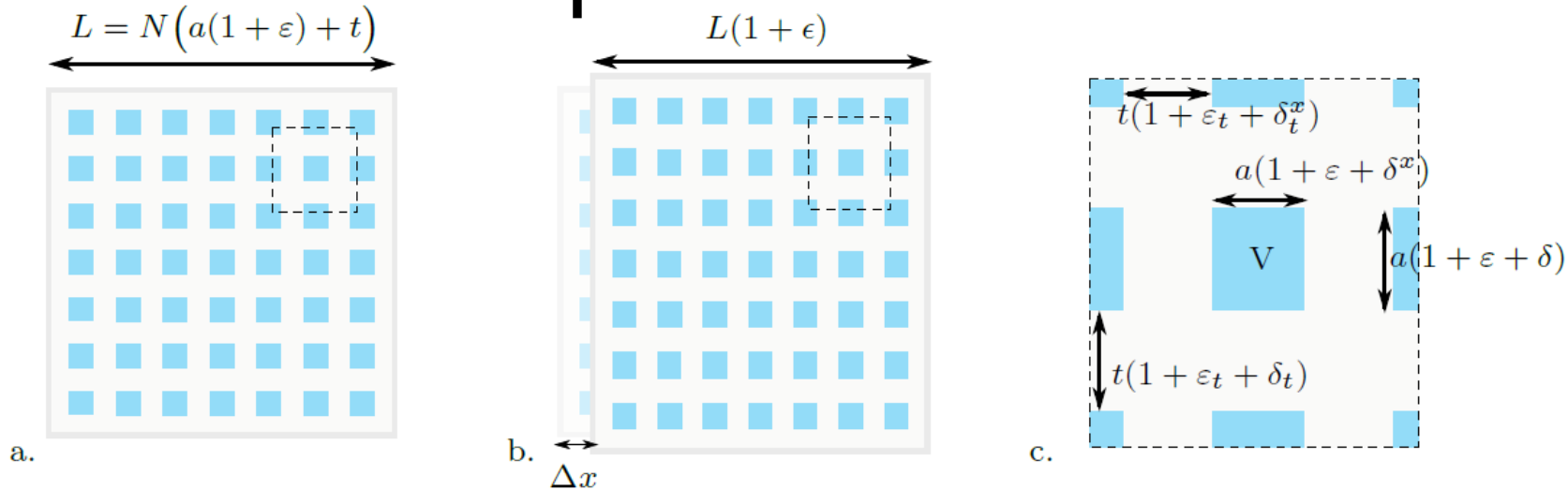
★ Expérience



$$P = P_0$$

La thermodynamique est-elle la clef ?

Cellules remplies d'eau



1. Cellules cubiques
2. Cinématique idéalisée
3. Paroi : comportement linéaire
4. Contrainte thermodynamique

Module d'Young apparent :

Volume d'un
élément
représentatif

$$Y = \frac{1}{V_p} \frac{d^2 W}{d \epsilon^2}$$

2nd dérivée de l'énergie
(sous contrainte
thermodynamique)

1. Transformation isochore

2. Transformation osmotique

3. Transformation isobare

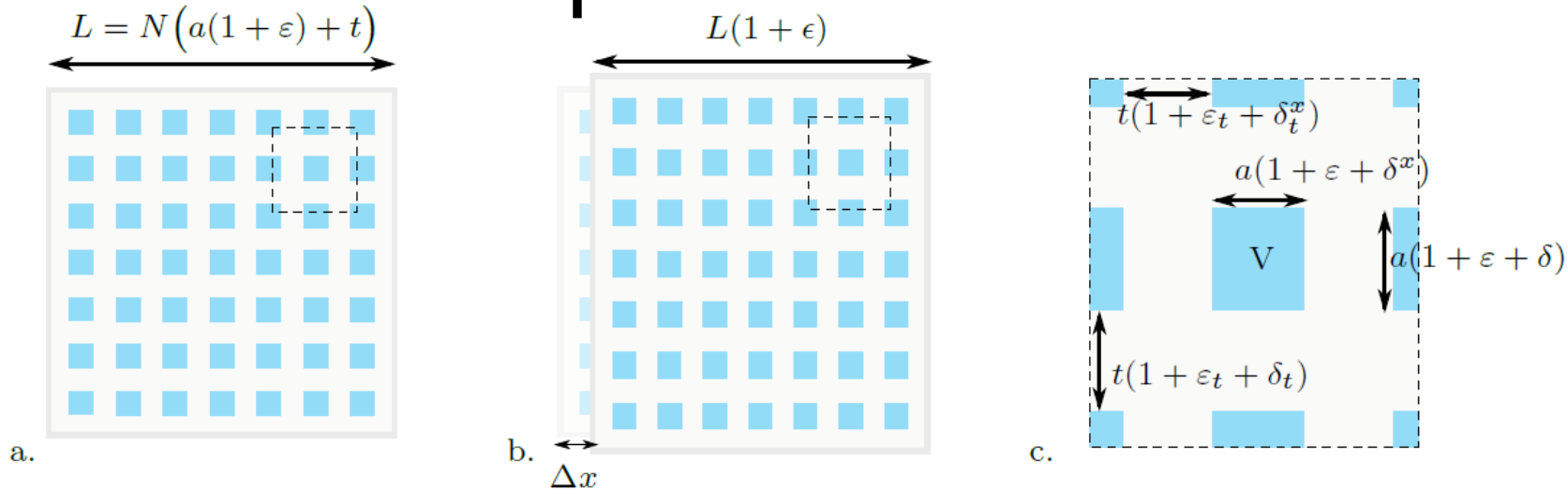
$$Y_{\text{iso-P}} = \frac{2(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{t}{a} E - \frac{(1-\nu)^2}{(1+\nu)(1-2\nu)} P$$

$$Y_{\text{iso-PV}} = \left(\frac{4}{9(1-2\nu)} + \frac{8}{9(2-\nu)} + \frac{10}{9(1+\nu)} \right) \frac{t}{a} E + \left(-\frac{1}{9(1-2\nu)} + \frac{4}{9(2-\nu)} - \frac{10}{9(1+\nu)} \right) P$$

$$Y_{\text{iso-V}} = \frac{3(4-6\nu)}{4(1-2\nu)(1+\nu)} \frac{t}{a} E + \frac{3\nu(3-7\nu)}{4(1-2\nu)(1+\nu)} P$$

La thermodynamique est-elle la clef ?

Cellules remplies d'eau



1. Cellules cubiques
2. Cinématique idéalisée
3. Paroi : comportement linéaire
4. Contrainte thermodynamique

Module d'Young apparent :

Volume d'un
élément
représentatif

$$Y = \frac{1}{V_p} \frac{d^2 W}{d \epsilon^2}$$

2nd dérivée de l'énergie
(sous contrainte
thermodynamique)

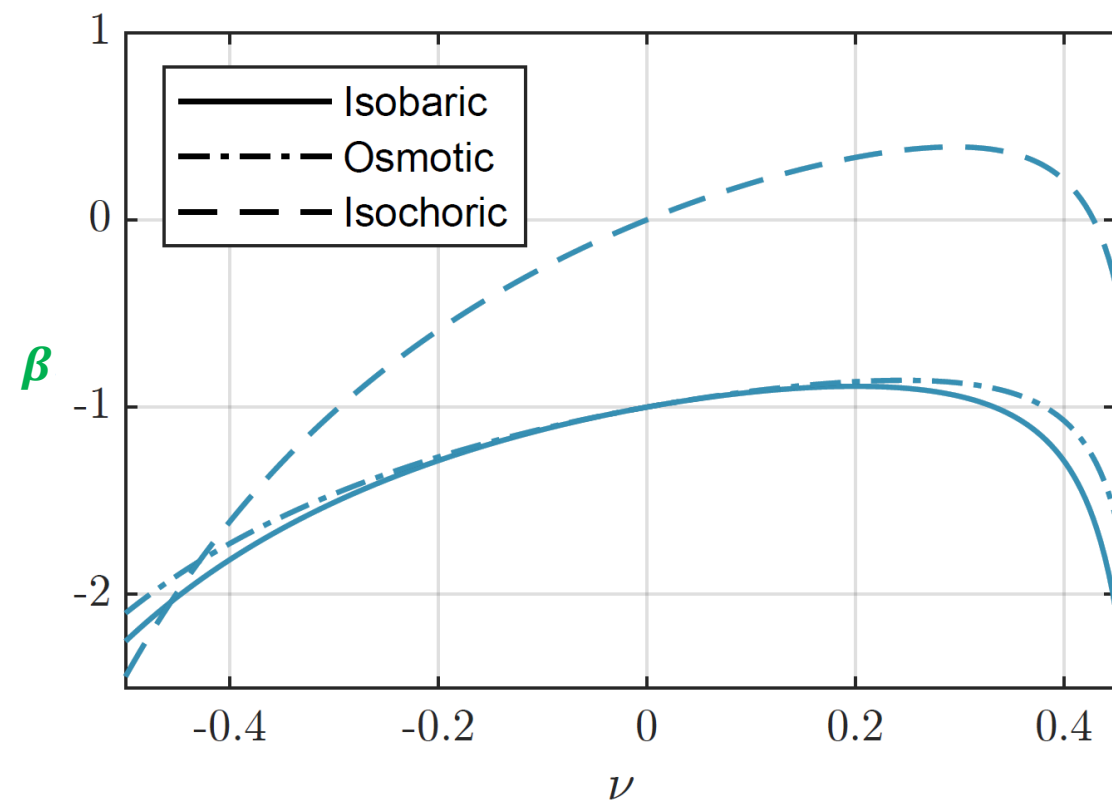
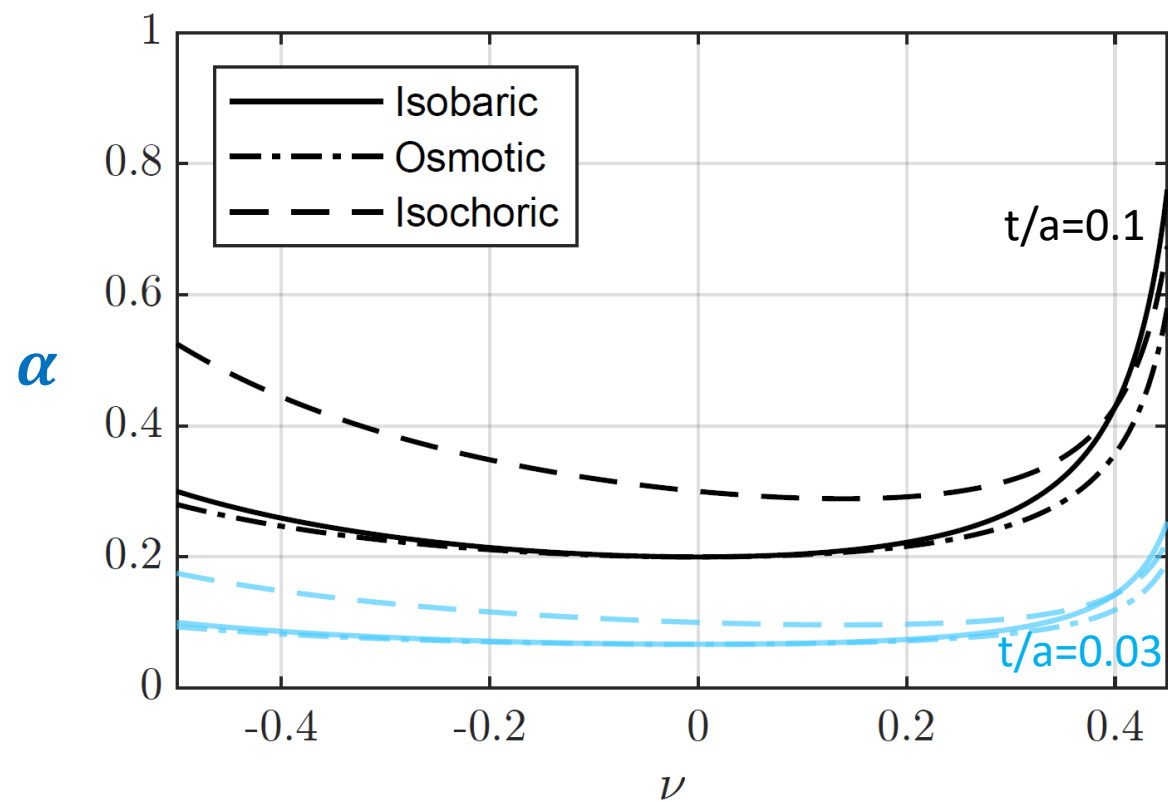
1. Transformation isochore

2. Transformation osmotique

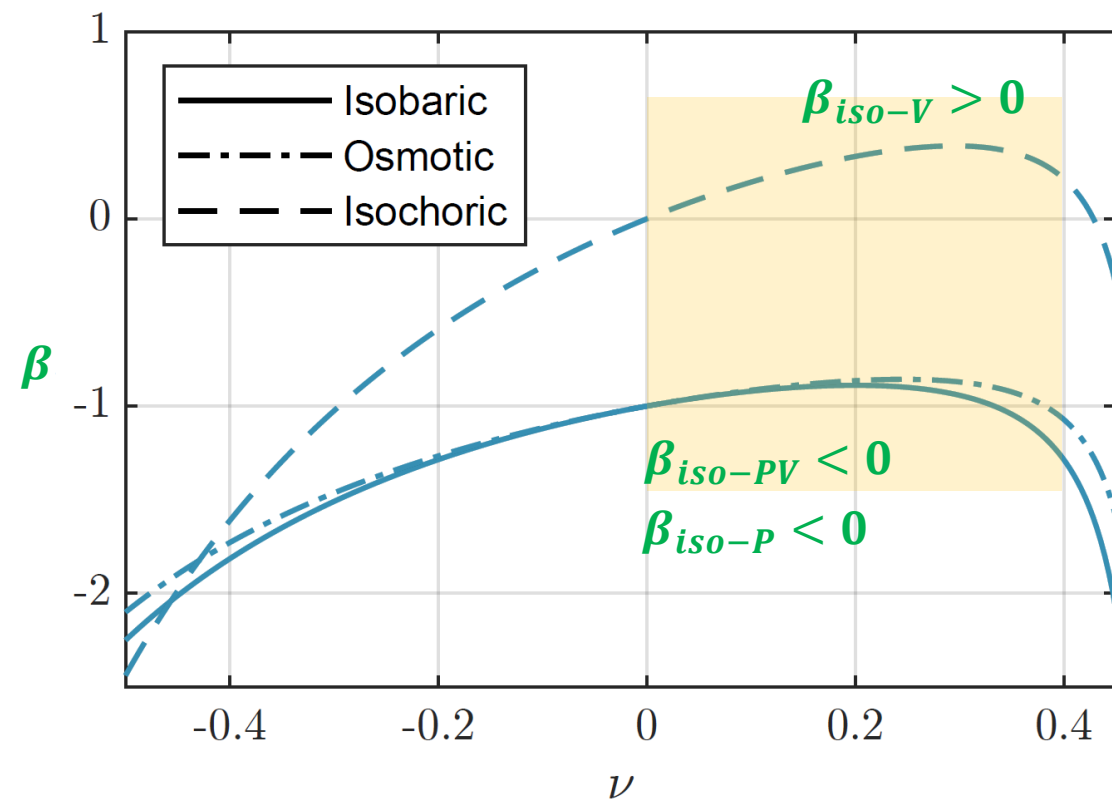
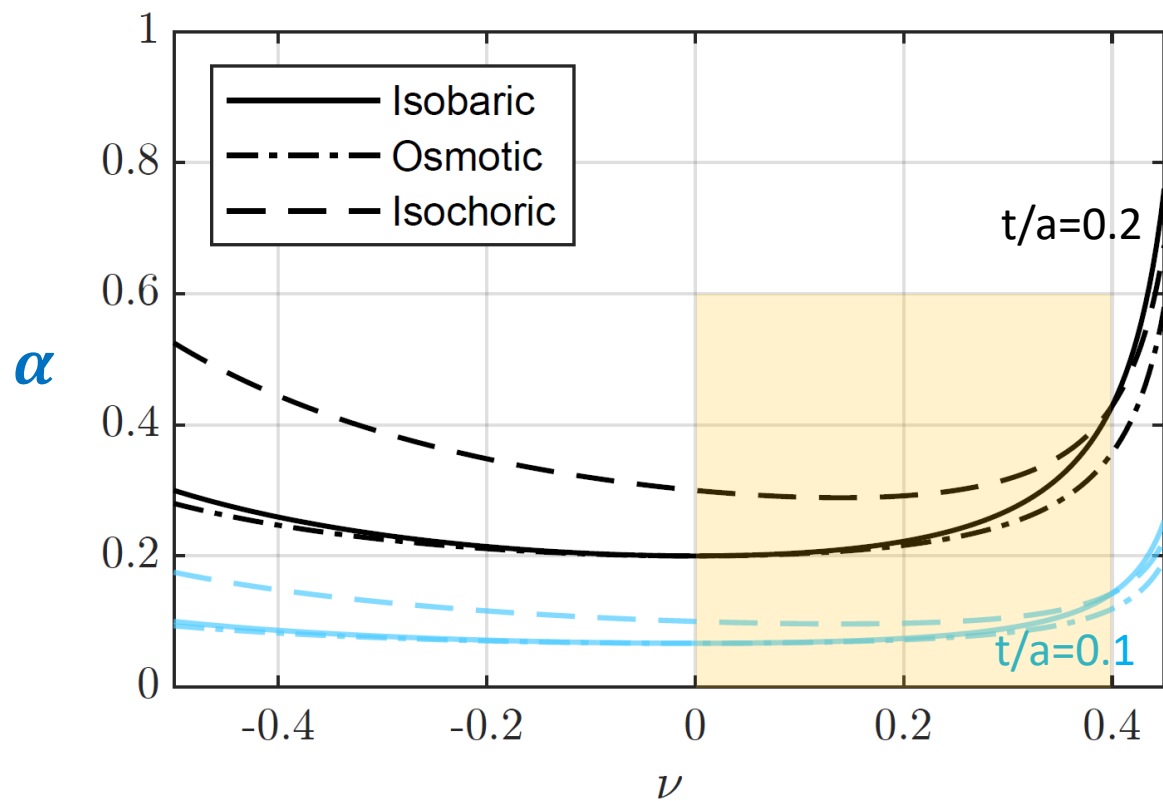
3. Transformation isobare

$$Y = \alpha E + \beta P$$

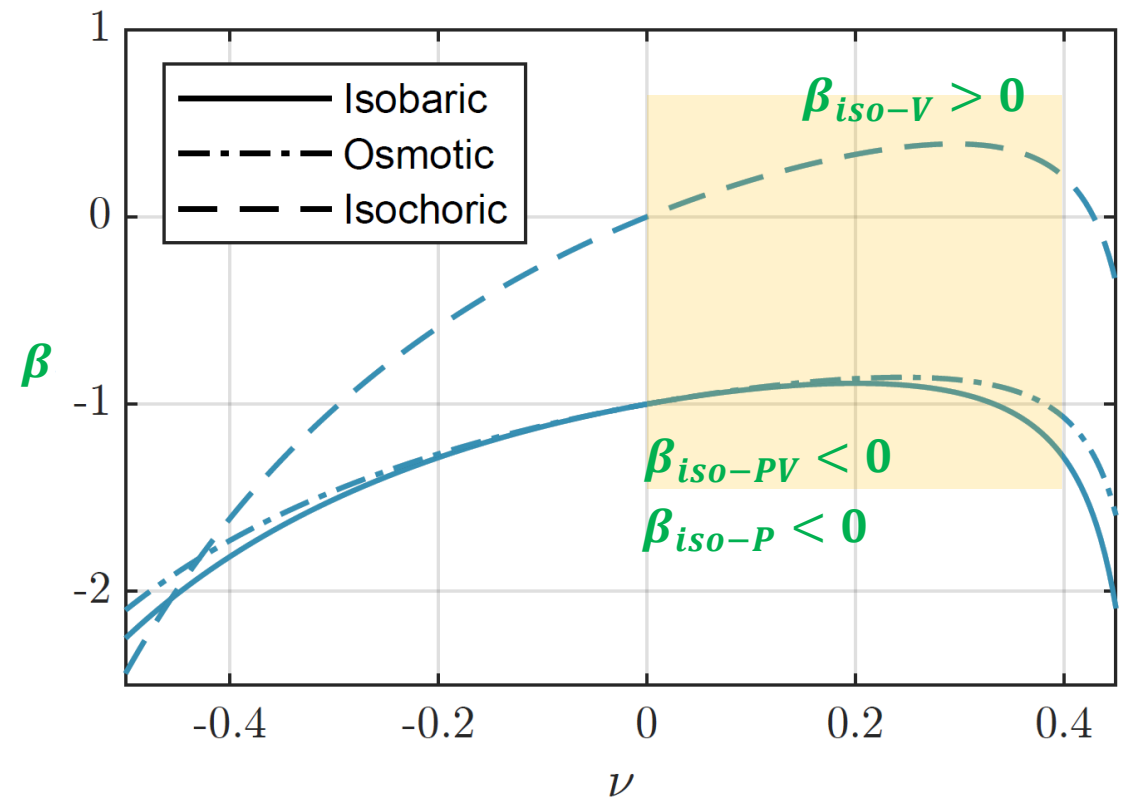
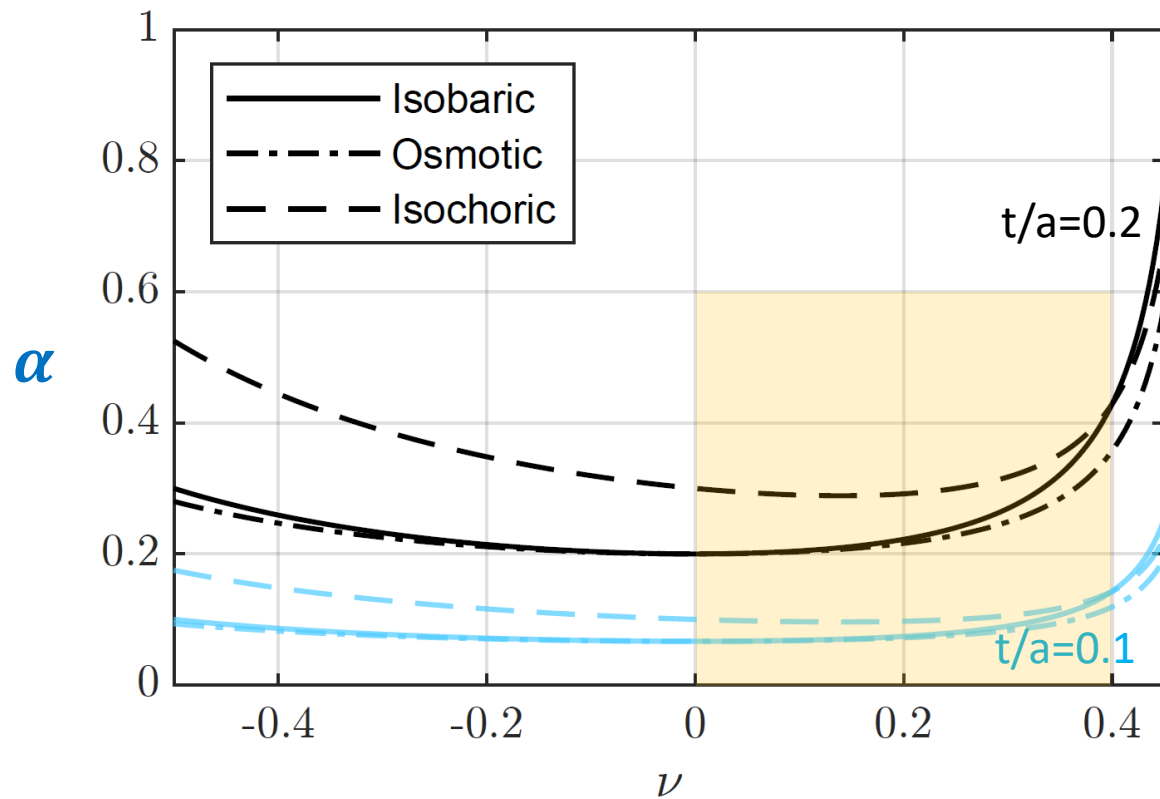
$$Y = \alpha E + \beta P$$



$$Y = \alpha E + \beta P$$

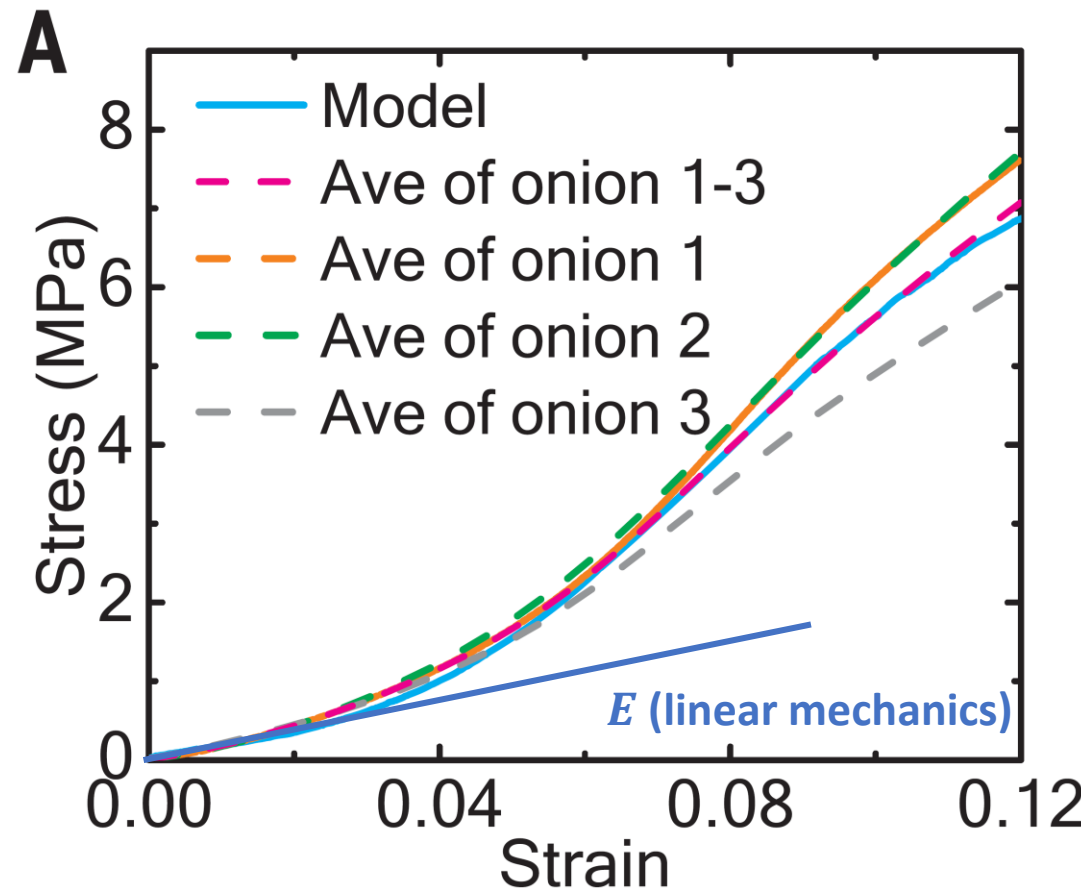


$$Y = \alpha E + \beta P$$



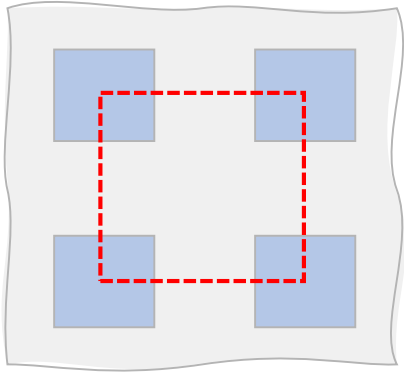
La thermodynamique seule ne permet pas de retrouver un comportement raidissant à la turgescence.

Les parois cellulaires des plantes sont rigidifiantes à l'élongation.



Simulations EF

- Élément de volume représentatif



$$E = 18 \text{ kPa}$$

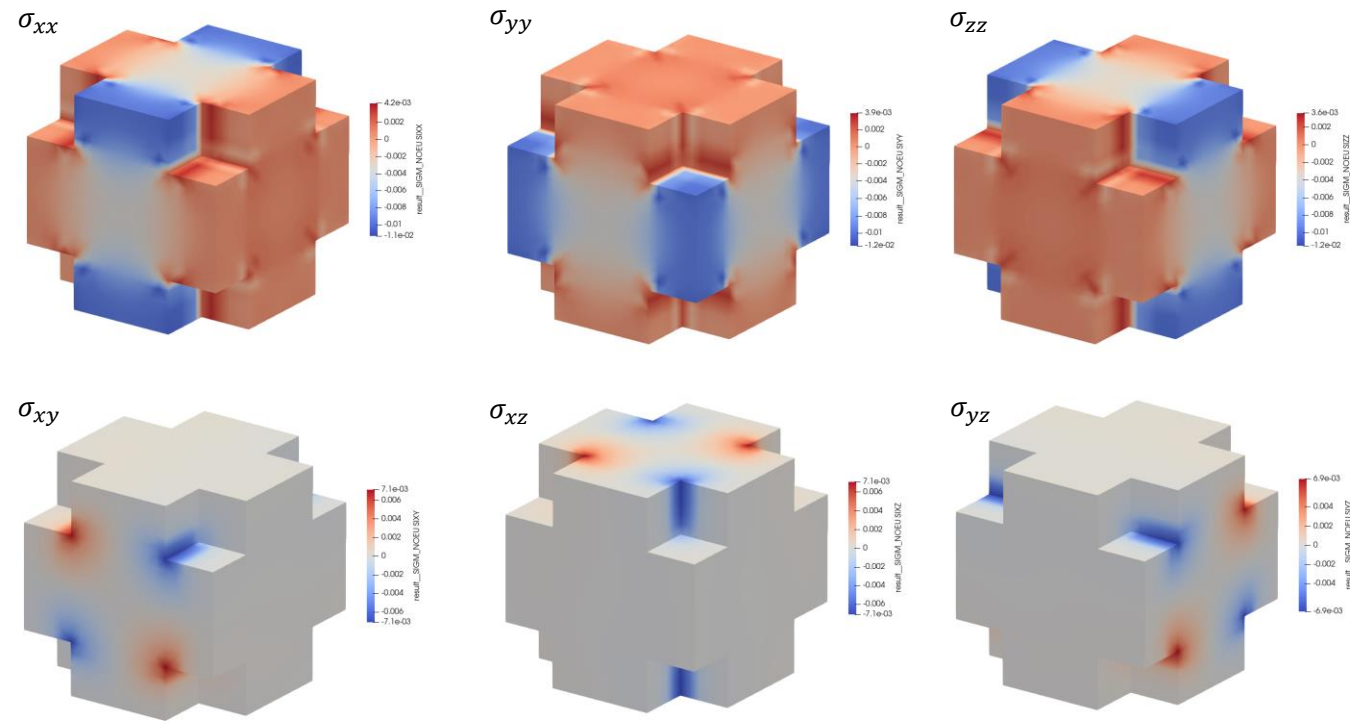
$$\nu = 0.4$$

$$a = t = 8 \text{ mm}$$

- Solide** : Modèle de Gent (strain-stiffening)

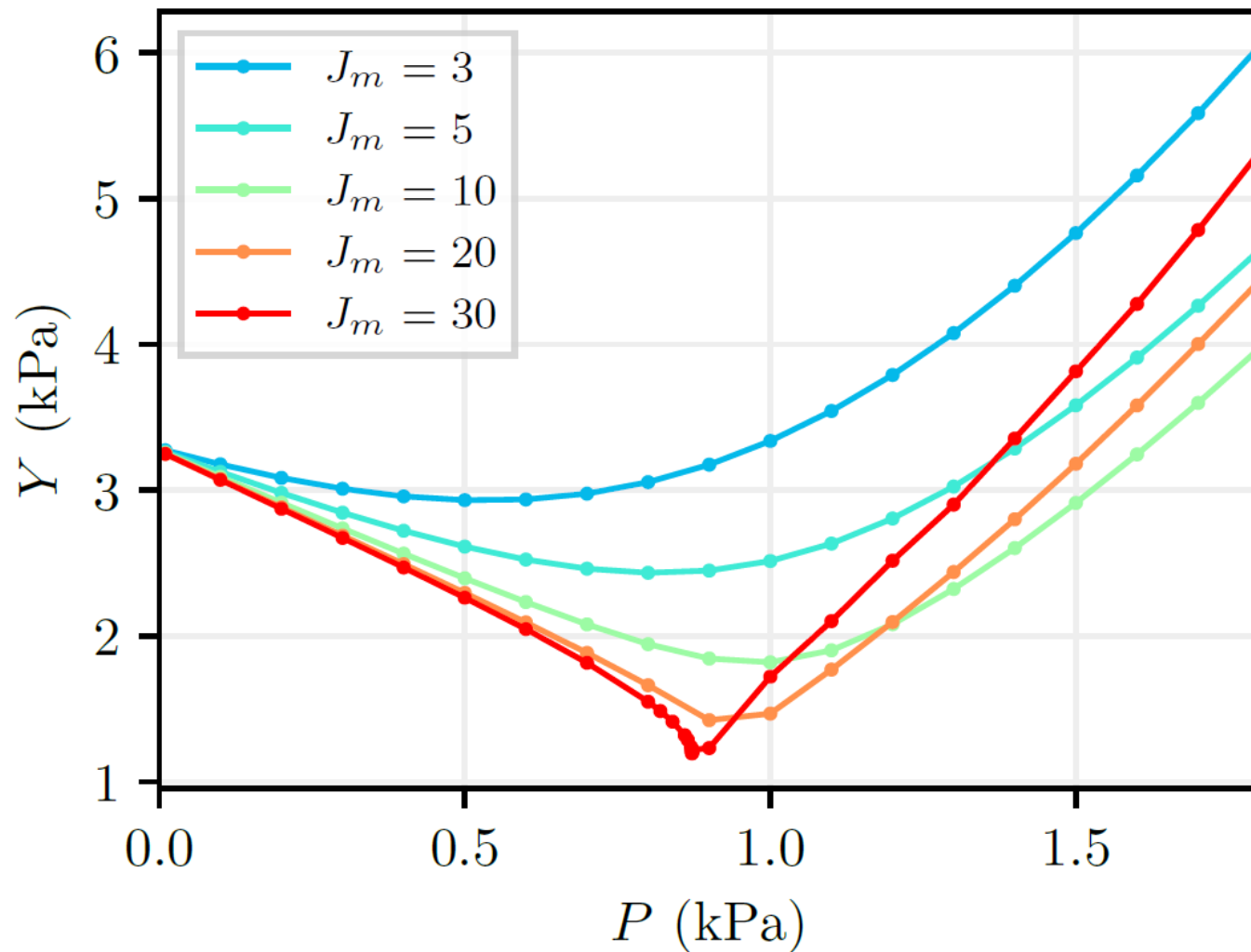
$$W(I_1, J) = -\frac{\mu}{2} \left(J_m \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{J_m} \right) + 2 \ln J \right) + \frac{K}{2} (J - 1)^2$$

- Fluide** : transformation isobare



Étapes de simulation :

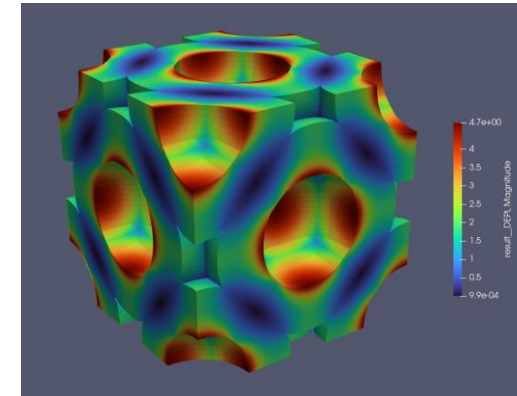
- (1) Gonflage → grandes déformations
- (2) Tests mécaniques autour de la configuration gonflée



Modèle de Gent (strain-stiffening)

$$W(I_1, J) = -\frac{\mu}{2} \left(J_m \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{J_m} \right) + 2 \ln J \right) + \frac{K}{2} (J - 1)^2$$

Le comportement rigidifiant à l'élongation permet de retrouver la raideur induite par turgescence.



2.3 Les qualités du système modèle biomécanique

Retour d'expérience sur le système modèle biomécanique :

1. Configuration simplifiée => Séparer les effets physiques et éviter la variabilité biologique.
2. Configuration simplifiée => Formulation mathématique minimale.
3. Confronter le modèle physique à la théorie
4. Permet d'unifier des systèmes différents sous une même théorie (solides cellulaires pressurisés)
5. Aspect visuel et didactique=> Avive l'intuition physique.

Sommaire

Partie 1 : Cours scientifique, le physicien mécanicien

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

1. Qu'est-ce qu'un système modèle ?
2. Un système modèle pour la mécanique quantique ?
3. Les qualités du système modèle biomécanique
- 4. Les dangers du système modèle biomécanique**
5. Conclusion : les systèmes modèles biomécaniques

Partie 3 : Projet de recherche , actionneurs bioinspirés

2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)

Les pétioles
sont courbés à
cause de la
gravité



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Les pétioles
sont courbés à
cause de la
gravité

Voix intérieure

Oui

Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)

2 mois plus tard : Voici la grande théorie unifiée de l'orientation des feuilles d'arbre sous gravité.



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Go ! Allons le
décrire comme
poutre
élastique

Voix du
directeur de
thèse



Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)

2 mois plus tard : Voici la grande théorie unifiée de l'orientation des feuilles d'arbre sous gravité.



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Go ! Allons le
décrire comme
poutre
élastique

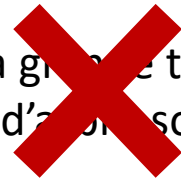
Voix du
directeur de
thèse



Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)

2 mois plus tard : Voici la grande théorie unifiée de
l'orientation des feuilles d'arbres sous gravité.



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Go ! Allons le
décrire comme
poutre
élastique

**Retourne la
feuille et
observe**

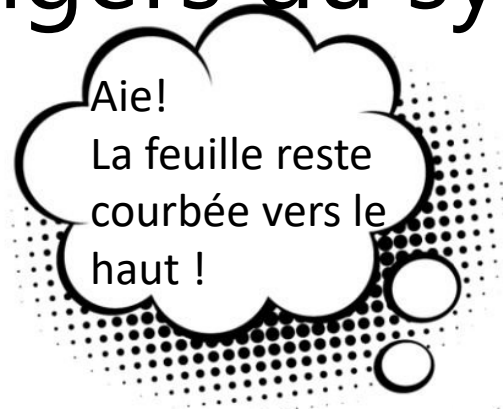
Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)

2 mois plus tard : Voici la grande théorie unifiée de
l'orientation des feuilles d'arbres sous gravité.



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique



Exemple 1 : Courbure des pétioles

- Description de l'effet de la gravité sur les feuilles (Elastica)
- Croissance non prise en compte
- Mauvaise compréhension du phénomène



2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

Dangers du système modèle :

1. Perdre de vue la complexité du phénomène
2. Perdre de vue l'action biologique
3. Se concentrer sur un modèle ne représentant pas la bonne physique

2.4 Les dangers du système modèle biomécanique

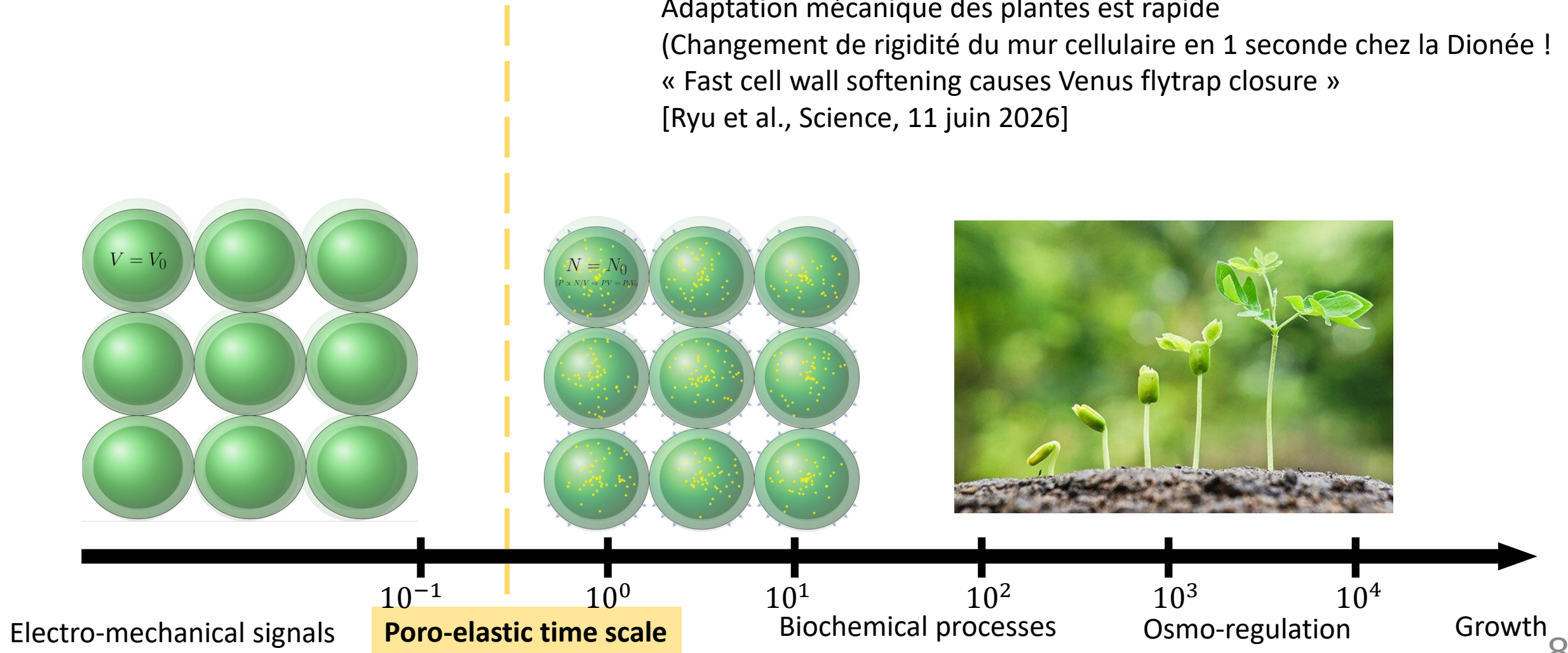
Exemple 2 : Fanaison des plantes

Adaptation mécanique des plantes est rapide

(Changement de rigidité du mur cellulaire en 1 seconde chez la Dionée !

« Fast cell wall softening causes Venus flytrap closure »

[Ryu et al., Science, 11 juin 2026]



Sommaire

Partie 1 : Cours scientifique, le physicien mécanicien

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

1. Qu'est-ce qu'un système modèle ?
2. Un système modèle pour la mécanique quantique ?
3. Les qualités du système modèle biomécanique
4. Les dangers du système modèle biomécanique
- 5. Conclusion : les systèmes modèles biomécaniques**

Partie 3 : Projet de recherche , actionneurs bioinspirés

2.5 Le système modèle en biomécanique

- Ingénierie -> Biologie

Séparer les effets physique et la variabilité biologique

Discuter des critères de selection de l'évolution

- Biologie -> ingénierie

Biomimétisme basé sur les solutions

Pressions de sélection multi-factorielles (optimum plat)

Recherche de convergences évolutives

- Notion d'**optimalité** différente en biologie, en ingénierie et en physique.

"When a variation is of the slightest use to a being, we cannot tell how much of it to attribute to the accumulative action of natural selection, and how much to the conditions of life." [Darwin, 1859]

Sommaire

Partie 1 : Coursus scientifique

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1. Présentation du projet de recherche
2. Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients
3. Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe
4. Médiation scientifique : biophysique des plantes

Sommaire

Partie 1 : Coursus scientifique

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1. Présentation du projet de recherche

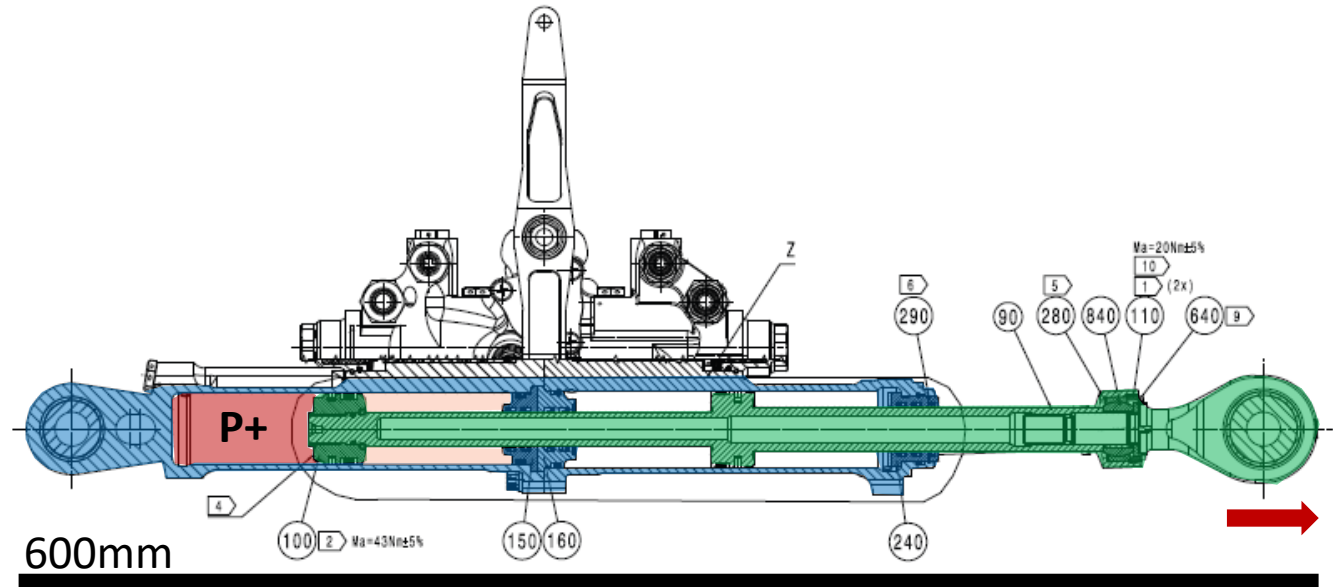
2. Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients

3. Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe

4. Médiation scientifique : biophysique des plantes

3.1 Projet de recherche : Résilience des actionneurs

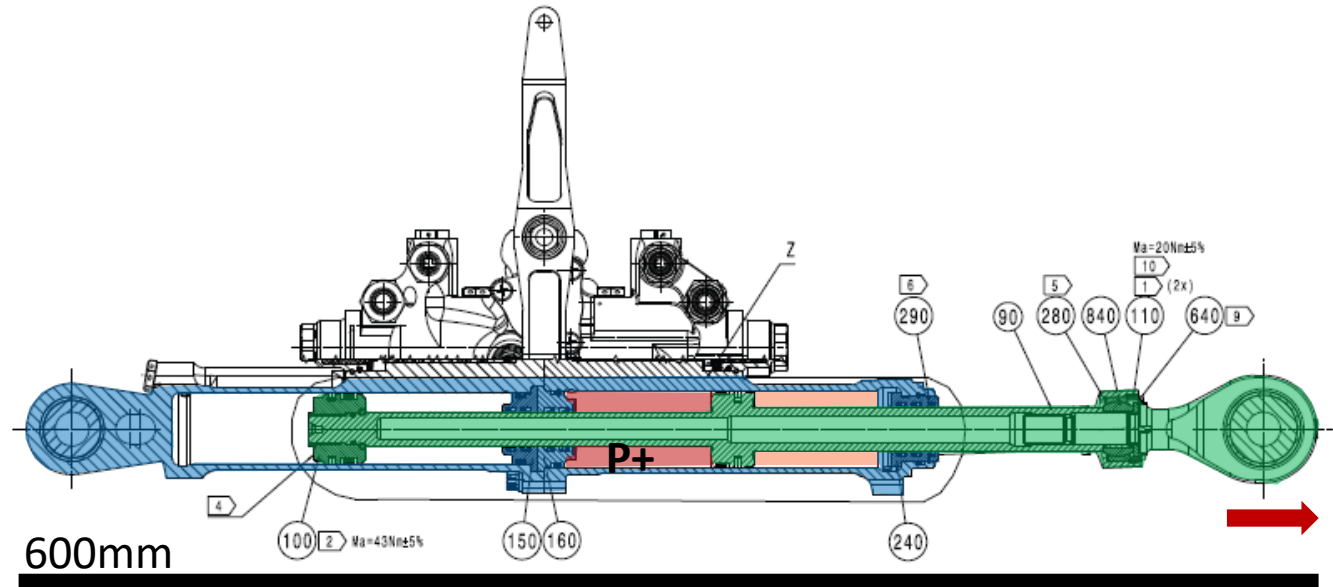
- **Constat industriel** : la redondance a un coût financier, énergétique, massif et stérique.
- Standard actuel : Redondance et surdimensionnement



Lourd, encombrant, cher et consommateur de ressources

3.1 Projet de recherche : Résilience des actionneurs

- **Constat industriel** : la redondance a un coût financier, énergétique, massif et stérique.
- Standard actuel : Redondance et surdimensionnement



Lourd, encombrant, cher et consommateur de ressources

3.1 Projet de recherche : Résilience des actionneurs

But long terme :

Remplacer la redondance macroscopique par la redondance mésoscopique.

Hypothèse de recherche :

La redondance mésoscopique permet de subir des dégâts locaux mais de continuer à fonctionner avec des performances réduites (résilience).

Axe1 : Actionneurs
électromécaniques
résilients

Axe 2 : Vers un
matériau cellulaire
polymathe

3.1 Projet de recherche

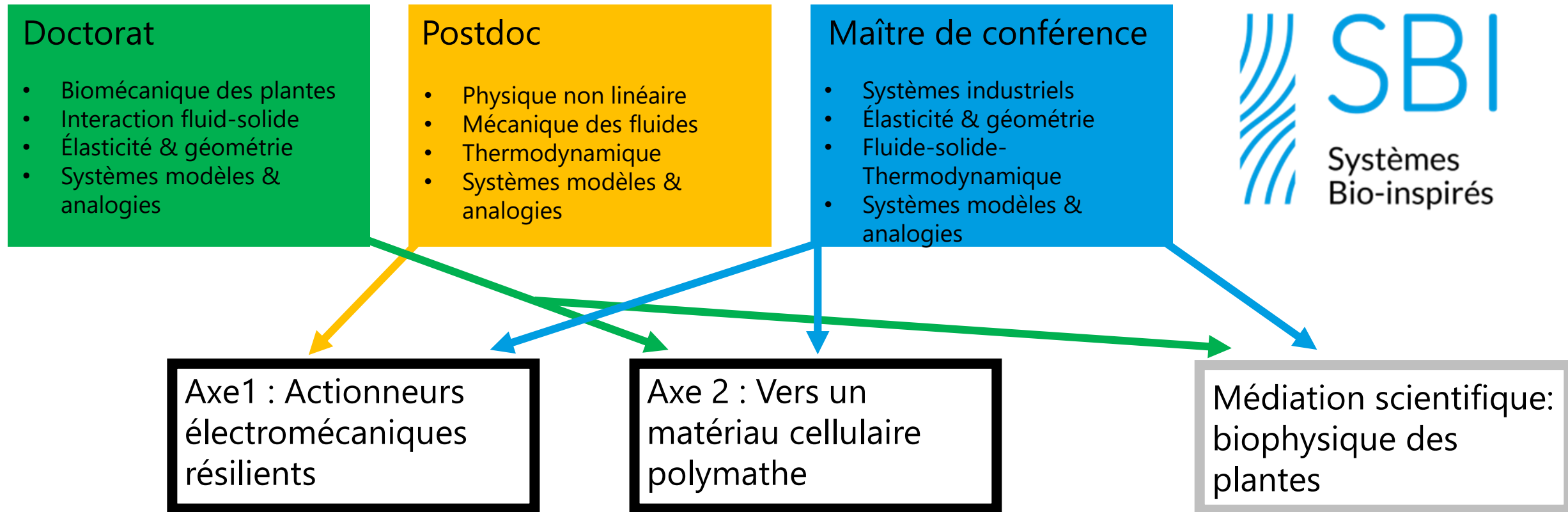
Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients

Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe

Médiation scientifique : biophysique des plantes

← Inspiré du muscle

← Inspiré du pulvinus



Sommaire

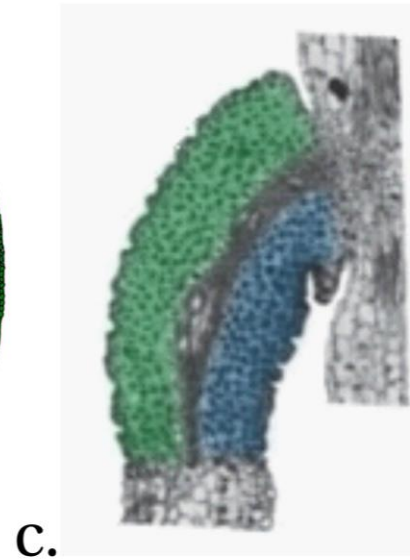
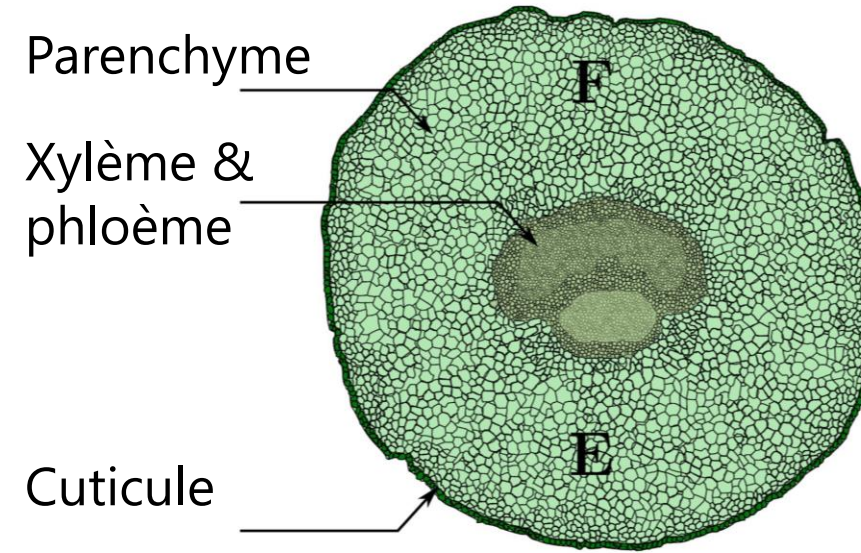
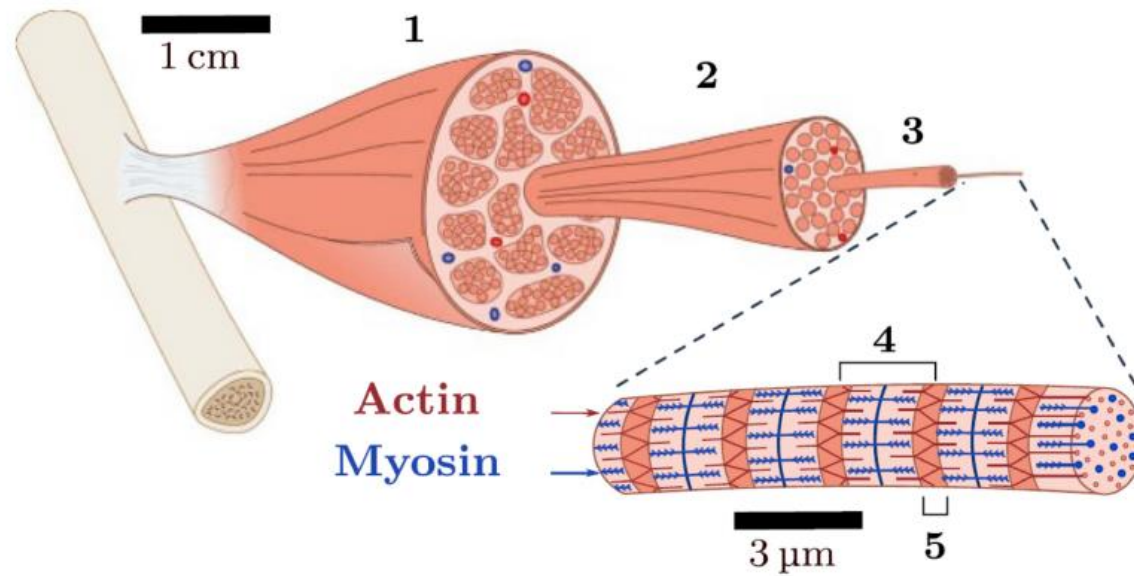
Partie 1 : Coursus scientifique

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1. Présentation du projet de recherche
- 2. Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients**
3. Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe
4. Médiation scientifique : biophysique des plantes

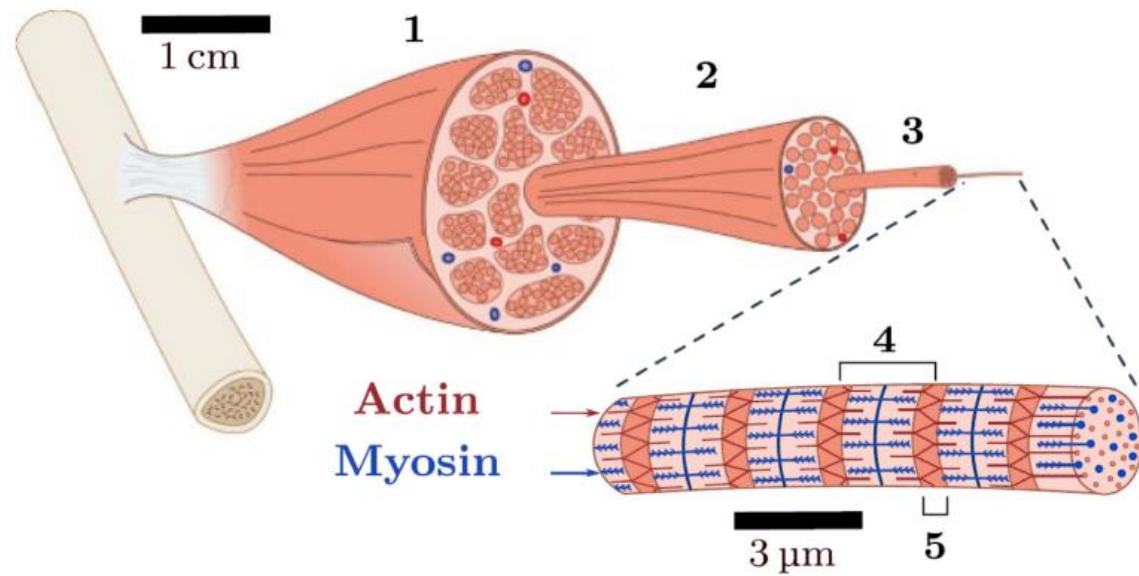
3.2 Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients



Actionneurs manufacturés : architecture robuste (sur dimensionnés) et redondants.

Actionneurs biologiques : architecture redondante à la micro-échelle, reconfigurables et réparables.

3.2 Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients



1) Vers une conception (architecture) industrielle

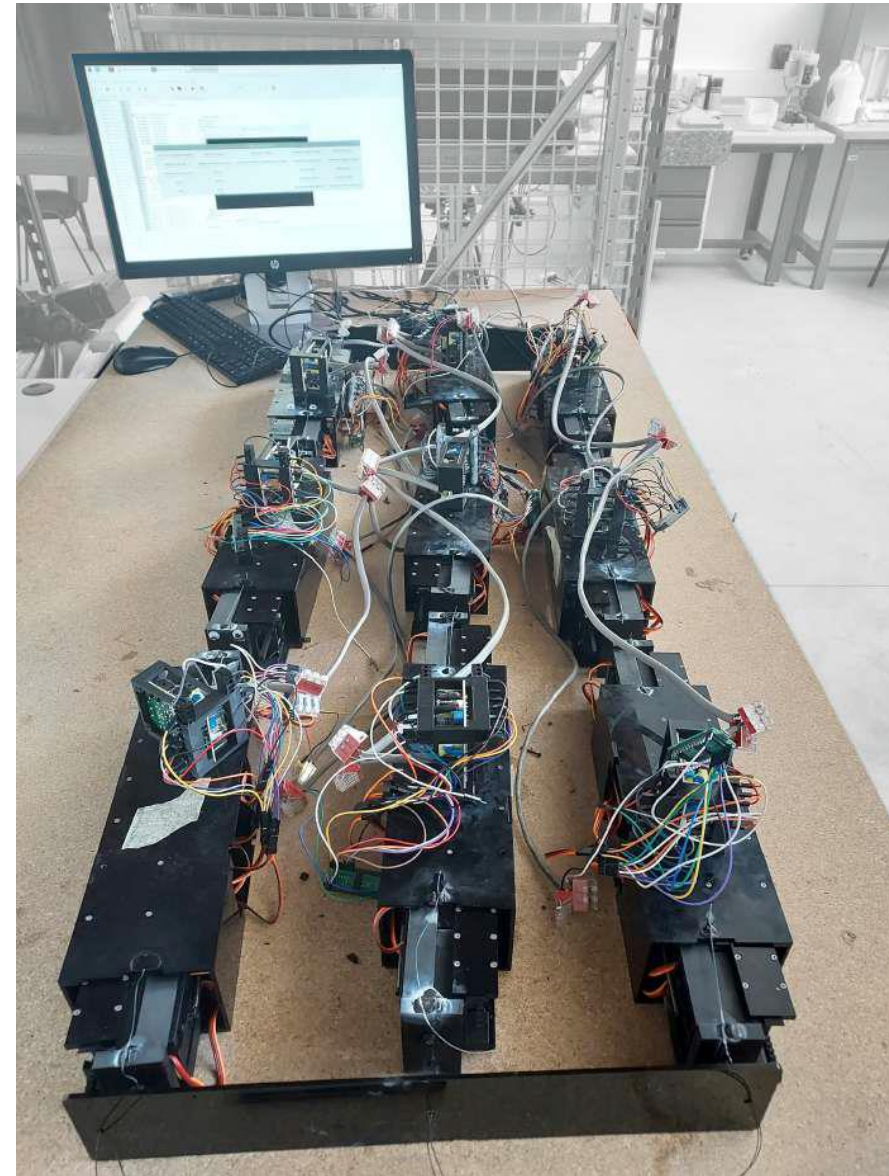
Supprimer les points faibles (concentration de contraintes)

Supprimer les câbles électriques

2) Vers un pilotage intelligent

Détection des dégâts

Apprentissage du mouvement en mode dégradé



3.2 Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients

Application envisagée

Exemple : VSR700

1. Vérin électrique 2kN (solution actuelle) :

Poids

1,5kg Avec redondance x2 : **3kg**

Coût

actionneur (5k€). Avec redondance : **10 k€**

2. Redondance mésoscopique 2kN :

Poids

Actionneurs élémentaires : environ 40 (40g chacun) => 1,6kg

Câblage : 24 câbles (diamètre 0,45, longueur 200mm)=4,8m

à 1kg/km => 5g

Carter Alu : plaques diamètre 100, épaisseur 5mm = 100g x2 => 200g

Poids total **< 2kg**

Coût

Actionneur élémentaire (0,1k€*40 = 4k€), contrôleur (1k€),

fabrication (2k€) : **7k€**

Co-développement envisagé : VSR700 (AIRBUS)

Drone hélicoptère 100% électrique



Poids : 760 kg

Longueur vérin :
600mm

Effort vérin: 2 kN

Gain de masse estimé : 33%

Gain de coût estimé : 30%

CNRS
INNOVATION

Sommaire

Partie 1 : Coursus scientifique

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

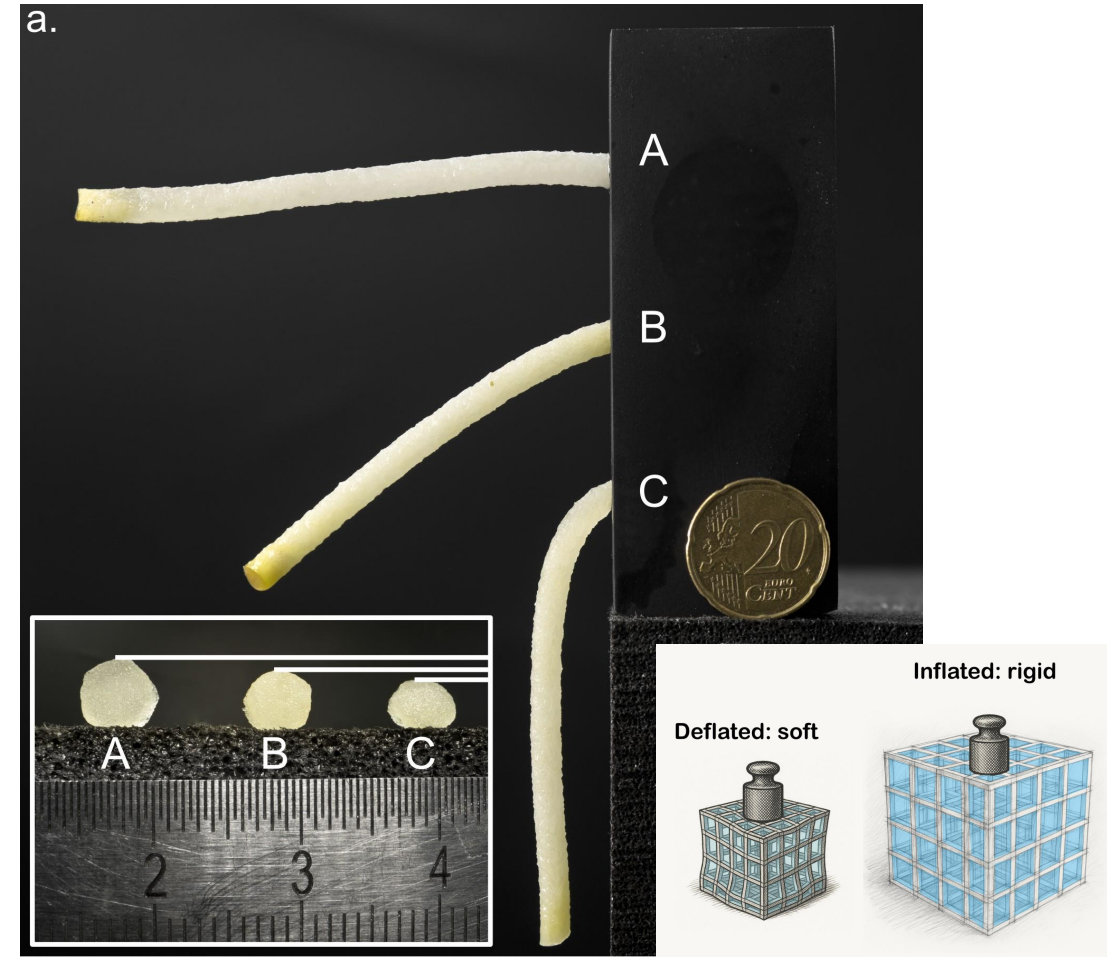
Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1. Présentation du projet de recherche
2. Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients
- 3. Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe**
4. Médiation scientifique : biophysique des plantes

3.3 Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe



Mouvement : géométrie et gonflement



Propriété mécaniques : géométrie et gonflement

3.3 Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe

1) Vers une conception (architecture) industrielle

Passer du pneumatique vers l'électro-osmose
(actionneur électrique + gain de bande passante)

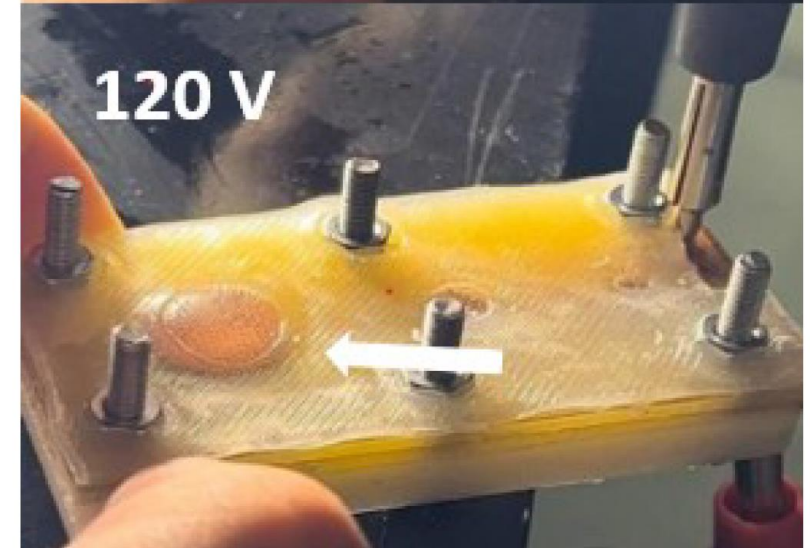
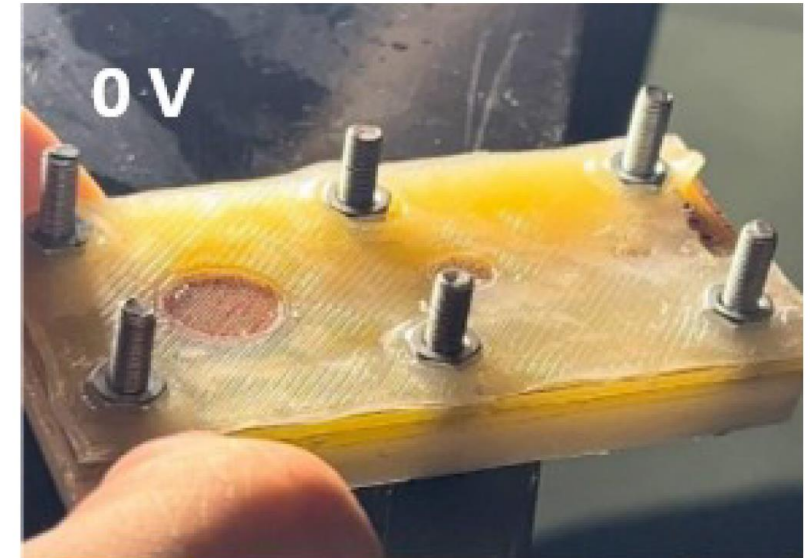
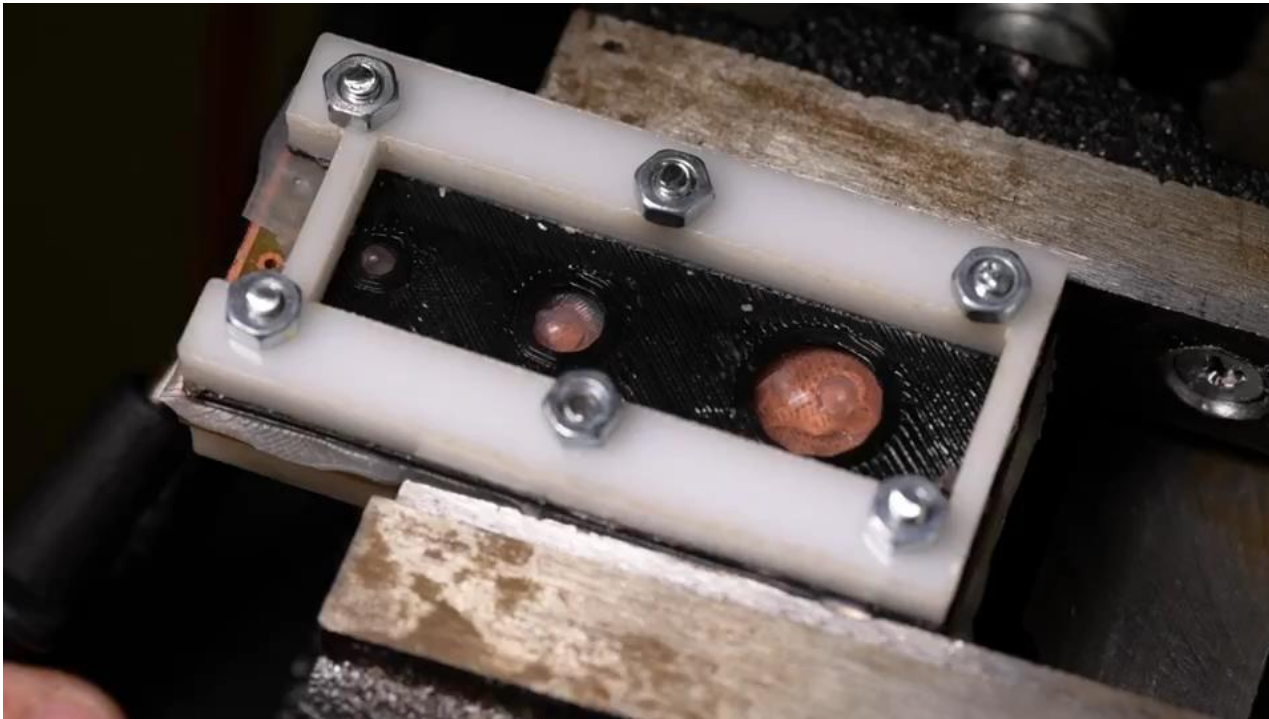
Limiter les câbles électriques

Choisir les bons matériaux souples

2) Vers un pilotage intelligent

Détection des dégâts

Apprentissage du mouvement en mode dégradé



Sommaire

Partie 1 : Coursus scientifique

Partie 2 : Quelques réflexions sur le système modèle

Partie 3 : Projet de recherche, actionneurs bioinspirés

1. Présentation du projet de recherche
2. Axe1 : Actionneurs électromécaniques résilients
3. Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe
- 4. Médiation scientifique : biophysique des plantes**

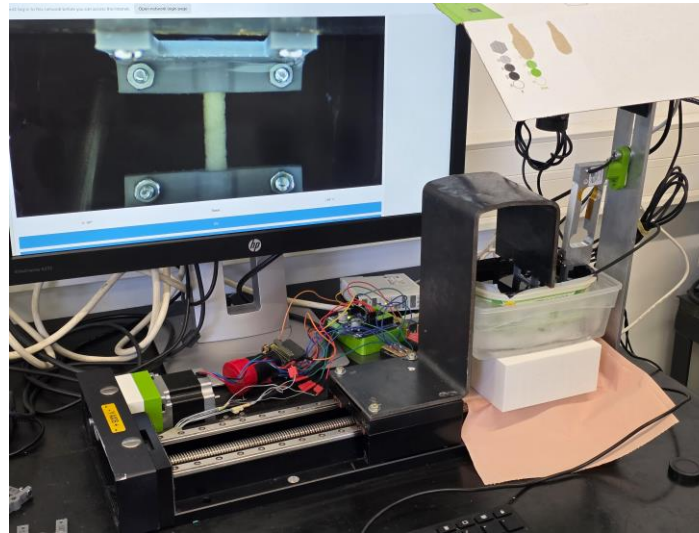
3.4 Médiation scientifique : biophysique des plantes

- Divulgence grand publique [collèges, lycées, manifestations scientifiques]
- Multidisciplinaire [fluides, solides, couplages aéroélastique, thermodynamique, capillarité, croissance, matière mole, matériaux, etc.]
- Basées sur les maquettes "recherche"
- Maquette physique + présence numérique

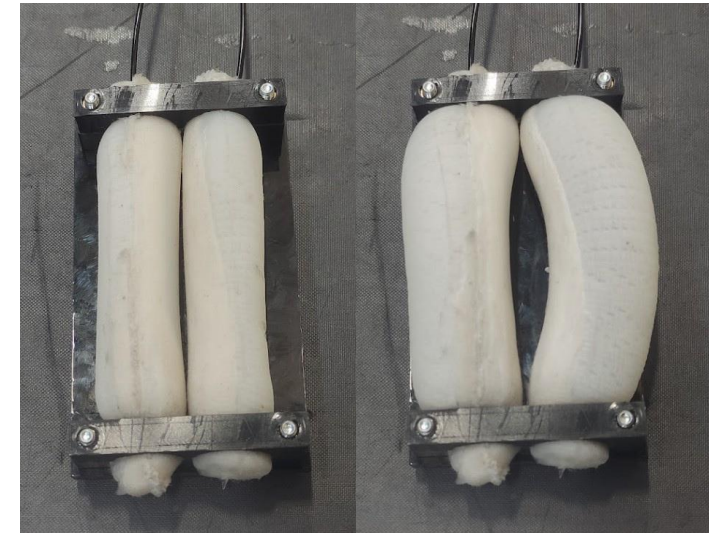
Thermique des feuilles flottantes



Rigidité des parenchymes



Ouverture des stomates



Maquettes potentielles : Mécanisme de Münch, théorie cohésion-tension, embolie, ponctuations torus-Margo, résistance au vent des forêts, actionnement des pulvini, etc. 98

Remerciements



F. Brochard-Wyart



E. de Langre



M. Soudreau



T. Gilet



J. Bush



J-M. Linares

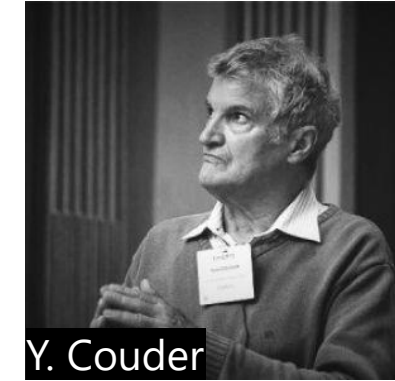


B. Moulia



Y. Forterre

Une pensée :



Y. Couder



A. Boudaoud

Collègues de thèse et de postdoc

Collègues de biomécanique des plantes

Collègues physiciens de la matière molle

Collègues de l'équipe SBI

Equipe pédagogique, technique et administrative du département GMP

Doctorants, ingénieurs, techniciens, stagiaires et étudiants

Habilitation à diriger des recherches

- Principaux résultats scientifiques
 - **Thèse** : Modélisation du mouvement du feuillage
 - **Postdoc** : Limites de l'analogie entre gouttes marcheuses et mécanique quantique
 - **Maître de conférence** : Rigidité des matériaux cellulaires pressurisés
- Projet de recherche
 - Axe 1 : Actionneur électromécanique résilient
 - Axe 2 : Vers un matériau cellulaire polymathe
 - Médiation scientifique : biophysique des plantes

amU Aix
Marseille
Université



INSTITUT ///////////////
DES SCIENCES ETIENNE
DU MOUVEMENT JULES
.....////////// MAREY



institut
universitaire
de France