

**BULLETIN N° 172**  
**ACADÉMIE EUROPEENNE**  
**INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**



**mardi 5 février 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**« Morphogenèse et embryogenèse »**

**Conférence de Martine BEN AMAR**

**Professeure à l'Université Pierre et Marie Curie-Paris 6**

**Laboratoire de Physique Statistique**

**École Normale Supérieure**

**Prochaine séance :**

**lundi 4 mars à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**"La matière organique insoluble dans les météorites carbonées et les roches archéennes"**

**Conférence de Sylvie DERENNE, Directrice de Recherche CNRS**

**Directeur-adjoint de l'UMR 7618 du CNRS : BioEMCo**

***Biogéochimie et écologie des milieux continentaux***

**Responsable de l'équipe de l'UMR 7618 localisée sur le site de Jussieu**

***"Géochimie Organique et Minérale de l'Environnement" (GOME)***

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

Siège Social : Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme 54, bd Raspail 75006 Paris

Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

# ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

## FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

**PRESIDENT** : Pr Victor MASTRANGELO  
**VICE PRESIDENT** : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE  
**SECRETAIRE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**TRESORIER GENERAL** : Claude ELBAZ

**MEMBRE S CONSULTATIFS DU CA :**

Gilbert BELAUBRE  
 François BEGON  
 Bruno BLONDEL  
 Patrice CROSSA-REYNAUD  
 Michel GONDRAN

**SECTION DE NICE :**

**PRESIDENT** : Doyen René DARS

**PRESIDENT FONDATEUR** : Dr. Lucien LEVY (†)  
**PRESIDENT D'HONNEUR** : Gilbert BELAUBRE  
**SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR** : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :**

**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES** : Pr Brigitte DEBUIRE

**CONSEILLERS SPECIAUX:**

**EDITION**: Pr Robert FRANCK  
**AFFAIRES EUROPEENNES** : Pr Jean SCHMETS

**SECTION DE NANCY :**

**PRESIDENT** : Pr Pierre NABET

février 2013

**N°172**

TABLE DES MATIERES

- P. 03 Compte-rendu de la séance du mardi 5 février 2013  
 p.06 Compte-rendu de la section Nice Côte d'Azur du 17 janvier 2013  
 P.11 Documents

**Prochaine séance:**

**lundi 4 mars à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**"La matière organique insoluble dans les météorites carbonées  
 et les roches archéennes"**

**Conférence de Sylvie DERENNE, Directrice de Recherche CNRS**

**Directeur-adjoint de l'UMR 7618 du CNRS : BioEMCo**

**(Biogéochimie et écologie des milieux continentaux)**

**Responsable de l'équipe de l'UMR 7618 localisée sur le site de Jussieu**

**"Géochimie Organique et Minérale de l'Environnement" (GOME)**

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES**  
**Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.**

**Séance du**

**Mardi 5 février 2013**

**Maison de l'AX 17h**

La séance est ouverte à 17h sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Gilles COHEN-TANNOUDI, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Jean-Pierre FRANCOISE, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Jacques LEVY

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Alain CARDON, Daniel COURGEAU, Robert FRANCK, Walter GONZALEZ, Gérard LEVY, Saadi LAHLOU, Valérie LEFEVRE-SEGUIN, Pierre MARCHAIS, Emmanuel NUNEZ, Pierre PESQUIES, Jean SCHMETS, Alain STAHL.

La séance est dédiée à la conférence "Morphogénèse et embryogénèse" de Mme Martine BEN AMAR, Professeure à l'Université Pierre et Marie Curie-Paris 6

**I) Le Président Victor Mastrangelo nous donne quelques éléments du CV de notre conférencière.**

Martine BEN AMAR, est Professeure de Classe exceptionnelle de l'Université Pierre et Marie Curie, membre de l'Institut Universitaire de France. Elle travaille au Laboratoire de Physique Statistique de l'ENS, 24 rue Lhomond 75005Paris.

Ancienne élève de l'Ecole Normale Supérieure (1973-1977), agrégée de Physique, elle a soutenu en 1984 une Thèse de Doctorat d'Etat portant sur "Modèle théorique en photoémission des systèmes atomiques dans le domaine de l'ultraviolet lointain. Application à l'Argent, à l'Iode et au Xénon". Après avoir été de 1987 à 1993 Maître de Conférences à l'ENS elle a été nommée en 1993 Professeure à l'Université Pierre et Marie Curie. Elle a également été Professeure invitée au MIT de 1999 à 2000 au Département d'Ingénierie Mécanique.

Elle a publié 113 articles dans des revues de renommée internationale et a contribué à 5 ouvrages scientifiques.

Après s'être intéressée à la physique statistique et à la mécanique des milieux continus elle s'est particulièrement orientée vers l'étude des instabilités en étudiant l'élasticité de ces milieux. Cette approche quelque peu différente de celles utilisées par les principaux laboratoires de biophysique lui a permis d'aborder une étude quantitative de la croissance des tissus en biologie telle la morphogénèse et l'embryogénèse ainsi que des applications en cancérologie.

## II) Conférence de Martine BEN AMAR: Morphogénèse et Embryogénèse"

Son étude consiste à considérer que les tissus du vivant sont des corps mous dont la forme serait régie par la croissance en volume et l'élasticité. Elle nous illustrera ceci par quelques exemples de morphogénèse tels les algues, les fleurs, la formation de la peau et des villosités dans l'embryogénèse, la croissance tumorale...Ceci la conduit à s'interroger sur le point ci-dessous:

### Comment la croissance en volume provoque-t-elle des structures compliquées?

Plusieurs facteurs interviennent:

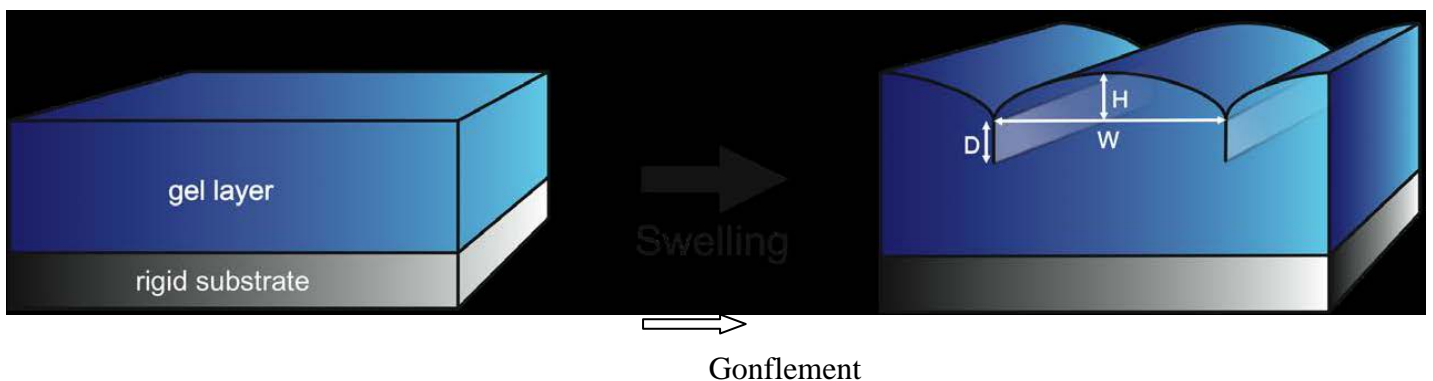
- Le processus de croissance est dépendant de l'espace et des nutriments
- La croissance concerne des tissus **anisotropes**.
- La croissance est soumise à des conditions aux limites et donc à des contraintes

### Les gels qui gonflent constituent un modèle physique de croissance des tissus biologiques.

Comme les gels, les tissus biologiques en croissance ont une élasticité. Même avec une symétrie sphérique et des lois de croissance assez simples au départ, on aboutit à des cas d'instabilité de forme. La croissance par unité de volume dépend de la position à l'intérieur de l'objet.

Pour des matériaux anisotropes, on obtient des croissances anisotropes qui génèrent beaucoup d'instabilité. Les instabilités sont également très liées aux contraintes mécaniques. On aboutit ainsi à des formes compliquées (fleurs) même avec des points de départ simples comme dans l'exemple ci-dessous de Tanaka.

Exemple géométrie de Tanaka (Nature 1987)



MBA and Ciarletta, JMPS 2010 exemple de gonflement d'un gel

Les modèles théoriques de croissance sont fondés sur un modèle de croissance volumétrique. Celle-ci repose sur l'étude de l'élasticité du matériau hyper-élastique en adoptant un **modèle néo Hookéen**<sup>1</sup> et une description du processus biologique. Un traitement analytique décrivant comment atteindre l'**énergie élastique minimale (stabilité)**. **Tant que ce minimum n'est pas atteint le système évolue (instabilité)**.

<sup>1</sup> voir site <http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~elias/ENSEIGNEMENT/Elasticite.pdf>

Elle nous donne les méthodes de calcul tensoriel de l'énergie élastique tant dans le plan d'étirement que dans celui perpendiculaire à ce même plan (énergie de flambage) . Les schémas de base sont la bifurcation depuis un état de symétrie élevée vers un état de symétrie moindre mais également d'énergie moindre. La bifurcation est régie par la fonction locale de croissance en fonction du temps.

Cette modélisation des instabilités de croissance s'adapte autant à la morphogénèse des algues vertes, qu'aux fleurs. Elle est d'un grand intérêt en embryogénèse. L'élasticité dans la croissance de tissus différents comme le derme et l'épiderme est accompagnée de grandes instabilités aboutissant à la formation de quantités importantes de creux à la surface. L'apparition de ces creux est due à la différence de nature entre le derme et l'épiderme au cours de la vie fœtale. Le même phénomène est observé pour l'apparition des villosités de l'intestin grêle.

Pour plus d'informations nous vous conseillons de consulter dans les documents les diapositives projetées par notre conférencière en p 16 ainsi que le site de l'Université Paris VII Diderot <http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~elias/ENSEIGNEMENT/Elasticite.pdf>

Après ce très riche exposé, notre séance prend fin,

Bien à vous

Irène HERPE-LITWIN

# Comptes-rendus de la section

## Nice-Côte d'Azur

*Il est aussi aisé de bien dire que difficile de bien faire.*

Vergennes.

### Compte rendu de la séance du 17 janvier 2013

(166<sup>ème</sup> séance)

#### **Présents :**

Richard Beaud, René Blanchet, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Pierre Gouirand, Jacques Lebraty, Maurice Lethurgez, Claude Nigoul, Jean-Marie Rainaud.

#### **Excusés :**

Jean Aubouin, Pierre Bourgeot, François Cuzin, Jean-Paul Goux, Maurice Papo.

- Nous venons d'apprendre que notre confrère François Demard a eu un incident cardiaque qui a nécessité la pose d'un pacemaker. Il est tout à fait rétabli. Toutes nos amitiés et à bientôt.

- François Cuzin est retenu par la rédaction d'un projet lourd de financement européen (Nice-Heidelberg) sur les mécanismes de l'hérité « ARNs ».

#### **1- Approbation du compte rendu de la 165<sup>ème</sup> séance.**

**Le compte rendu est approuvé à l'unanimité des présents.**

#### **2- Le mois écoulé.**

##### **La Fondation Sophia Antipolis**

René Blanchet nous informe que le Conseil d'administration de la Fondation Sophia Antipolis s'est réuni le 11 janvier 2012 au siège de la Fondation. Le Conseil prend acte de la décision de Pierre Laffitte de mettre fin à ses fonctions de Président et de demander à Dominique Fache d'assurer la succession.

Le Conseil d'administration unanime a remercié chaleureusement Pierre Laffitte pour l'action exemplaire menée toutes ces années et a proposé de le nommer président d'honneur.

Après un large échange de vues, tenant compte des positions de tous les administrateurs, Dominique Fache a proposé d'élaborer un projet stratégique sur le rôle de la Fondation Sophia Antipolis et son

indispensable interaction avec les différents acteurs de la technopole. Ce document sera réalisé dans les meilleurs délais et présenté au prochain Conseil d'administration de la Fondation. Entre temps, afin de faciliter la transition, Pierre Laffitte et Dominique Fache assureront conjointement la présidence.

Notre ami Pierre Laffitte s'est montré heureux et confiant pour l'avenir.

René Dars : c'est en mai 1968, sur les bancs de l'Ecole des Mines de Paris, que Pierre Laffitte, alors sous-directeur de l'Ecole, m'a fait part de son projet de créer, près de Nice, autour de Saint-Paul –son village-, un centre de recherche scientifique regroupant des laboratoires français ou étrangers, publics ou privés.

Au cours de l'entretien, nous avons ressenti que nos yeux nous piquaient : c'était le passage boulevard Saint Michel, de la dernière manifestation étudiante, avec accompagnement policier, de ce mois que l'on dit historique.

Pierre Laffitte me savait être à l'Ecole ce jour-là et venait donc me parler de ce projet et me demander s'il pourrait compter sur des membres de la jeune Faculté des Sciences pour l'aider à le réaliser. Je venais d'être nommé à Nice en octobre. Je lui dis que le projet était intéressant mais que pour avoir un avis autorisé, il serait mieux qu'il demande au Doyen Jean Dieudonné qui venait de créer la Faculté de Nice. Pierre Laffitte me répondit avoir déjà questionné le Doyen Dieudonné : il s'était montré favorable et conseillait d'en parler à son successeur. Je m'interrogeais pour imaginer qui pourrait être le successeur de Jean Dieudonné. A mon grand étonnement, Pierre Laffitte me dit que pour Jean Dieudonné, ce serait moi ! Je venais de quitter la Sorbonne avec l'ambition de construire, à Nice, un laboratoire de recherche sur le continent africain et n'envisageais pas de me consacrer aussi à la gestion d'une jeune Faculté.

Cependant, quelques mois plus tard, quand l'université de Nice a été créée, mes collègues m'ont élu aux fonctions de doyen.

Huit jours plus tard, au téléphone, Pierre Laffitte me demande si je suis prêt à travailler au projet de ce que certains ont appelé une utopie et qui, mondialement connue, est la technopole de Sophia Antipolis.

La Fondation a bénéficié, dès le départ, d'un très important espace de maquis inhabité dépendant de plusieurs communes que l'on a pu associer en vue du projet.

René Blanchet : c'est une Fondation abritante, reconnue d'utilité publique comme la Fondation de France. C'est donc un outil administratif de première importance qui présente beaucoup de souplesse en même temps qu'une garantie dans la gestion avec le commissariat aux comptes.

Elle fut d'abord une structure de développement et d'attraction pour des entreprises sur le site de Sophia. C'est ainsi que les neuf hôtels implantés sur le site étaient la conséquence des relations personnelles entre Pierre Laffitte et M. Dubrule, alors Président du Groupe Accor.

Dans notre système français, la Fondation a été vite parasitée par les structures administratives qui se sont succédé sans que l'on n'en supprime jamais.

Avec les transformations en vue pour les Départements et les Régions, Sophia Antipolis se trouve confronté à des difficultés d'image.

Il va appartenir à M. Fache de prendre en main tous les problèmes redoutables pour l'avenir de la Fondation, ce qu'il ne va pas manquer de faire. Il devra aussi augmenter son rayonnement international.

### **3- Le Club de Nice : énergie et géopolitique (Claude Nigoul).**

#### Naissance et croissance

Naissance en 2000 à l'initiative municipale de Bernard Asso : créer un lieu de rencontre et de réflexion sur les relations énergétiques entre l'Europe et la Russie où se retrouveraient experts, décideurs publics et privés, nationaux et internationaux.

Initiateurs : IEHEI, Cres et Académie des Sciences de Russie.

## Réflexion géopolitique

Qu'est-ce que la géopolitique ? Terme devenu banal : la géopolitique c'est la discipline qui étudie l'incidence des facteurs liés à l'espace ou, plus prosaïquement, la géographie, sur les relations de pouvoir. De même qu'il y a une géographie physique, politique, économique, c'est une discipline qui s'intéresse donc aux territoires, à leur configuration, à leurs frontières aussi bien qu'aux climats, aux populations, à leurs variations et à leurs mouvements, et, évidemment, aux ressources qu'ils recèlent et aux échanges dont ils font l'objet.

Je pense personnellement que les facteurs déterminants de la politique, c'est-à-dire des relations de pouvoir, relèvent d'une part de la psychologie des hommes et des peuples et, d'autre part, de la géopolitique. Evidemment dans une relation dialectique permanente. Ainsi pour donner un seul exemple, la politique du IIIème Reich a été déterminée aussi bien par le désir de revanche d'Adolf Hitler et du peuple allemand, la haine des Juifs et le mythe de la supériorité aryenne que par la recherche du *Lebensraum*, de l'espace vital.

Pour le géopoliticien, les ressources ont toujours été l'élément prépondérant des relations internationales pour une raison simple qui est l'inégalité entre les espaces et donc entre les hommes, de leur allocation.

Elles sont donc la raison des échanges mais aussi des conquêtes même si, notamment pour ces dernières, les facteurs psychologiques jouent toujours un rôle de premier plan : constitution des empires, colonisation, contrôle des voies du commerce, etc.

L'or fut un temps ce facteur prépondérant.

C'est aujourd'hui l'accès à l'énergie qui a pris sa place et est devenue le facteur structurant majeur des relations internationales.

La création du Club de Nice repose sur ce constat et sur le désir d'en observer l'évolution dans un cas précis : celui des relations énergétiques entre l'Europe et la Russie.

Ce choix peut se justifier par différentes raisons.

- Comme la plupart des économies industrielles de la planète, celle de l'Europe sur l'énergie issue des ressources fossiles, principalement des hydrocarbures, pétrole et gaz.
- L'Europe qui n'en possède guère en dehors du charbon, actuellement mais peut-être, provisoirement délaissé.
- La Russie en est abondamment fournie, au premier chef de gaz et les échanges déterminants avec différents pays doivent, pour cette raison, être gérés, dans l'intérêt des deux parties, dans le long terme.
- Les relations énergétiques entre l'Europe et la Russie créent une interdépendance qui est un facteur structurant des relations internationales.
- Enfin, et c'est un choix du Club, ces relations sont le socle d'un rapprochement plus large, qu'ils jugent souhaitable pour les équilibres du continent et de la planète.

### **Le Club de Nice : organisation**

- association loi de 1901
- conseil de 8 membres : 4 Français, 4 Russes
- 2 co-présidents

### **Premier forum en 2002**

- 100 à 150 participants
- experts et décideurs de différents pays
- présence russe de très haut niveau
- ouvert désormais aux étudiants avancés, ingénieurs des Mines et relations internationales (Science Po)

### **Thèmes traités**

- en fonction de l'actualité énergétique mondiale mais toujours sous l'angle de la géopolitique et des relations entre l'Europe et la Russie

### **Le 11<sup>ème</sup> forum de 2012**



Question : l'évolution actuelle du monde de l'énergie correspond-elle à des changements sectoriels sans effets majeurs sur les relations internationales ou l'accumulation de ces changements est-elle en train de provoquer une redistribution dans les relations internationales qui pourrait les bouleverser à terme ?

Deux exemples régionaux et un phénomène global :

### 1- Arctique

- découverte de nouvelles ressources qui seraient considérables
- ouverture des passages maritimes, du nord-est et du nord-ouest, une partie de l'année

A qui appartiennent ces ressources et qui devrait en décider ? D'où un impact sur les relations Russie-Amérique du Nord et sur l'ensemble de la zone arctique avec, pour compliquer les choses, de très grandes difficultés d'accès et d'extrême fragilité de ce milieu.

### 2- Méditerranée orientale

- découverte récente de très importants gisements *off shore*, principalement de gaz (disputes de souveraineté sur les ressources entre la Turquie, Chypre, Israël, Liban, Gaza, Egypte)
  - découvertes sur le territoire d'Israël qui, combinées avec celles qui existent au large de ses côtes, pourraient assurer son indépendance énergétique alors qu'il est actuellement tributaire du gaz d'Egypte.
- Impact sur l'ensemble de la problématique de la zone (reconfiguration des alliances) et sur l'évolution du conflit israélo-palestinien.

### Gaz de schiste ou gaz de roche mère

Ce n'est pas nouveau. En 1972, lors de la première crise pétrolière, on a prospecté les schistes bitumineux de l'Alberta mais aujourd'hui, c'est économiquement rentable.

Inconvénients : risques environnementaux liés aux techniques d'exploitation qui ne sont, en fait, guère différentes de celles qui sont employées pour le pétrole.

Impact géopolitique évident.

Principalement

- réduction de la dépendance des pays possesseurs de ces nouvelles ressources,
- bouleversement des marchés, notamment du gaz : baisse des prix et des positions dominantes,
- indépendance énergétique des Etats-Unis qui deviennent exportateurs,
- affaiblissement de la Russie et sa reconversion vers ses marchés de l'Est,
- affaiblissement des pays producteurs du Moyen Orient (Arabie saoudite, Qatar, Iran) dont on voit déjà les premiers signes.

Patrice Crossa-Raynaud : en fait, on s'aperçoit que les ressources nouvellement découvertes que vous avez citées et auxquelles il faut ajouter celles, considérables, du Brésil font que le pic du maximum de production de pétrole et de gaz tant redouté s'éloigne sensiblement et que seul le coût d'extraction, et donc de vente, entrera en ligne de compte. Dans ces conditions, les énergies renouvelables deviennent de moins en moins intéressantes car trois fois plus chères.

René Blanchet : le charbon est aussi une ressource considérable notamment en Australie, en Mongolie, etc.

Claude Nigoul : les inconvénients écologiques (!) des éoliennes sont de plus en plus évidents et le solaire est dans les mains des Chinois.

\*\*\*\*\*

Prochaine réunion  
le jeudi 21 février 2013 à 17 heures  
au siège : Palais Marie Christine - 20 rue de France  
06000 NICE

Prochaine conférence à la Bibliothèque Nucéra  
Parking Promenade des Arts  
le mercredi 27 février 2013 de 17 à 19 heures  
Maurice Lethurgez  
« *De la langue d'Adam à la langue poétique* »

## Documents

Pour préparer la conférence de Mme Sylvie DERENNE, nous vous proposons

p. 12. les résumés et introductions en français de *Model of molecular structure of the insoluble organic matter isolated from Murchison meteorite* issu de *Meteoritics and Planetary Science* 1-14(2010), et de *Molecular evidence for life in the 3.5 billion year old Warrawoona chert* issu de *Earth and Planetary Science Letters* 272 (2008) 476–480 écrits par Sylvie DERENNE et François ROBERT - Le texte complet des deux articles sera publié (en anglais dans le prochain bulletin).

pour illustrer la conférence de la Pr Martine BEN AMAR, nous vous proposons:

p. 16 l'ensemble des diapositives projetées lors de la conférence.de la Pr Martine BEN AMAR

## Model of molecular structure of the insoluble organic matter isolated from Murchison meteorite

Sylvie DERENNE<sup>1\*</sup> and François ROBERT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BioEMCo, UMR CNRS 7618, UPMC, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'Etude de la Matière Extraterrestre, UMS CNRS 2679 NanoAnalyses, Museum National d'Histoire Naturelle, 61 rue Buffon, 75005 Paris, France

\*Corresponding author. E-mail: sylvie.derenne@upmc.fr

(Received 10 May 2010; revision accepted 28 July 2010)



Meteoritics & Planetary Science 1–14 (2010)

### Modèle de structure moléculaire pour la matière organique insoluble isolée dans la météorite de Murchison

#### RESUME

La structure moléculaire de la Matière Organique Insoluble (MOI) de la météorite de Murchison a été explorée par notre groupe pendant plusieurs années à l'aide d'un vaste ensemble de méthodes analytiques incluant diverses spectroscopies ( *spectroscopie infrarouge* basée sur la transformation de Fourier, *résonance magnétique nucléaire*, *résonance paramagnétique électronique*, *spectroscopie près du front d'absorption des rayons-X*), la microscopie électronique de haute résolution, et les dégradations thermiques ( pyrolyses en présence ou non d'hydroxyde de tétraméthylammonium) et chimiques (oxydation du RuO<sub>4</sub>). La conjugaison de ces techniques a fourni une richesse d'informations qualitatives et quantitatives qui nous ont fourni 11 paramètres propres aux éléments et molécules du même résidu de MOI. En plus de la composition élémentaire de base, ces paramètres décrivent aussi bien la distribution des différents types d'atomes -carbone, azote, et soufre - que la taille des unités polyaromatiques. C'est pourquoi, nous proposons pour cette structure moléculaire un modèle qui rend compte de ces 11 paramètres moléculaires quantitatifs. Plusieurs implications cosmologiques dérivent de cette structure. En se basant sur le fait que se produisent d'importantes substitutions dans les fragments aromatiques et connexions dans les chaînes aliphatiques, on peut présumer que la synthèse de cette MOI se soit produite grâce aux additions successives d'unités carbonées élémentaires dans la phase gazeuse se terminant en une cyclisation spontanée pour les chaînes de longueur supérieure ou égale à 7 carbones. Dans leur ensemble ces observations confortent l'idée d'une organosynthèse dans le disque solaire T-Tauri.

#### INTRODUCTION

On sait que les chondrites carbonées contiennent des quantités substantielles ( jusqu'à 4%) de matière organique, qui se présente principalement sous forme de Matière Organique Insoluble (MOI). De nombreuses études réalisées depuis les années 1970 étaient dédiées au déchiffrement la structure chimique de ces MOI, tout particulièrement pour la météorite de Murchison. Le fait est qu'une connaissance précise de la structure de la macromolécule organique contient une information irremplaçable concernant ses mécanismes de synthèse et ses conditions de formation. Au cours des 10 dernières années, nous avons participé à ce travail avec l'objectif de reconstruire la structure moléculaire d'ensemble de la MOI de Murchison. Ceci nous a conduit à proposer un modèle préliminaire (Rémusat et al.2007). Cette dernière était qualitative et limitée à un petit nombre de fragments et comme il en été fait mention par les auteurs eux-mêmes, "dessiner un nouveau modèle moléculaire devrait être l'objet d'un programme futur". La principale faiblesse de ce modèle de structure semble être la grande taille des unités aromatiques qui se révèlent impossibles à mettre en équilibre avec les chaînes aliphatiques courtes requises par les

paramètres moléculaires. Dans cet article, nous proposons une structure modélisée tellement plus complète qui prend en compte tous ces paramètres.

La MOI qui constitue plus de 75% de la masse de la majorité de la matière organique est isolée de la masse rocheuse à l'aide d'extractions par l'eau et des solvants pour retirer les composés solubles organiques et des traitements successifs par HF/HCL pour dissoudre le gros de la matrice minérale. De tels traitements par les acides sont réputés ne pas altérer ma MOI (Durand et Nicaise 1980). Les résidus insolubles dans les acides sont riches en MOI mais ils contiennent un matériau inorganique constitué principalement d'oxydes naturels, de sulfures, et de chlorures selon la diffraction aux rayons X.

La structure chimique de la MOI isolée sur Murchison a été étudiée autant par des méthodes destructives que non destructives. Les premières comprennent des dégradations thermiques et chimiques suivies de chromatographie gazeuse /spectroscopie de masse (GC/MS) (*Studier et al. 1972; Lévy et al. 1973; Hayatsu et al. 1977, 1980, 1983; De Vries et al. 1993; Komiya and Shimoyama 1996; Sephton et al. 1998, 2000, 2004; Remusat et al. 2005a, 2005b; Huang et al. 2007; Yabuta et al. 2007*) et les dernières comprennent essentiellement des techniques spectroscopiques (résonance magnétique nucléaire (RMN), spectroscopie infrarouge à transformées de Fourier (FTIR), spectroscopie d'absorption près du front des rayons X (XANES) et résonance paramagnétique électronique (EPR) conjointement avec de la microscopie électronique de transmission de haute résolution (HTREM) (*Cronin et al. 1987; Ehrenfreund et al. 1992; Gardinier et al. 2000; Cody et al. 2002, 2008; Cody and Alexander 2005; Binet et al. 2002, 2004a, 2004b; Derenne et al. 2002, 2005; Yabuta et al. 2005; Wirick et al. 2006*)

Bien que chaque technique séparée ne puisse fournir une information définie sur la structure chimique d'un matériau si complexe, la combinaison des résultats peut servir à reconstruire la structure moléculaire de la MOI. Néanmoins, les données quantitatives sont des paramètres clés pour construire un tel modèle et en assurer la validité. C'est pourquoi, nous n'utiliserons que les études se référant à ce type de paramètres pour construire le modèle et nos observations qualitatives serviront à étayer nos discussions. Il importe également de noter que des variations dans les compositions élémentaire d'ensemble, ont été consignées dans la littérature (probablement tributaires des procédures d'isolation des résidus acides). Pour surmonter ce biais d'analyse, tous les paramètres utilisés dans cet article ont été obtenus sur le même résidu, qui contenait 19% de matière minérale (*Gardinier et al 2000*).

Les détails de cette structure révèlent une information sur les conditions de formation spatiale de la MOI. C'est pourquoi, le dernier paragraphe de cet article discute de la possibilité des voies d'organosynthèse dans un contexte cosmochimique de formation du système solaire.

## Molecular evidence for life in the 3.5 billion year old Warrawoona chert

Sylvie Derenne <sup>a</sup>, François Robert <sup>b</sup>, Audrey Skrzypczak-Bonduelle <sup>a,c</sup>, Didier Gourier <sup>c</sup>,  
Laurent Binet <sup>c</sup>, Jean-Noël Rouzaud <sup>d</sup>

a UMR CNRS 7618 BioEMCo, 11 rue P. M. Curie, 75231 Paris cedex 05, France

b LEME, UMS CNRS 62, MNHN, 61 rue Buffon, 75005 Paris, France

c LCAES, UMR CNRS 7574, ENSCP, 11 rue P. M. Curie, 75231 Paris cedex 05, France

d Laboratoire de Géologie, UMR CNRS 8538, ENS, 24 rue Lhomond, 75231 Paris cedex 05, France

Earth and Planetary Science Letters 272 (2008) 476–480

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/epsl>

### Preuve moléculaire d'existence de la vie dans le dépôt siliceux vieux de 3,5 milliards d'années de Warrawoona

#### RESUME

L'origine biologique de la matière organique dans les sédiments siliceux les plus anciens dépôts siliceux continue à faire débat. Pour traiter ce problème, la matière organique insoluble (kérogène) a été repérée à partir d'un dépôt siliceux de Warrawoona (Australie). La structure chimique du kérogène a été étudiée grâce à la combinaison de techniques analytiques comprenant la résonance magnétique nucléaire du <sup>13</sup>C à l'état solide et la pyrolyse. Bien que dominée par les hydrocarbures aromatiques, le pyrolysat comprend une série homologue de longues chaînes d'hydrocarbures aliphatiques caractérisées par une prédominance des nombres de carbones impairs sur les nombres pairs. Cette distribution ne s'accorde qu'avec une origine biologique. Comme le kérogène doit être contemporain de la solidification du dépôt siliceux, cette observation devrait être considérée comme une preuve de la présence de la vie sur Terre il y a 3,5 milliards d'années.

#### Introduction

Les dépôts siliceux font partie des roches sédimentaires les plus anciennes sur Terre et elles offrent un remarquable registre de microfossiles bien préservés à travers le précambrien. Sur la base d'observations spectroscopiques et morphologiques les microstructures âgées de 3,5 milliards d'années dans le dépôt siliceux du sommet du groupe Warrawoona en Australie ont été attribuées à des cyanobactéries fossiles et ainsi elles constitueraient la plus vieille preuve de la vie sur Terre (Schopf, 1993). En s'ajoutant à des critères morphologiques, la nature carbonée des microstructures établies par spectroscopie LASER RAMAN, a été considérée comme une preuve de leur biogénicité. (Schopf et al., 2002). Cependant, la validité de ce critère en tant que preuve de vie a été remise en cause et il est maintenant admis que la spectroscopie RAMAN seule ne peut prouver la biogénicité. (Pasteris and Wopenka, 2002). Qui plus est, on a montré que la synthèse abiotique (Fischer-Tropsch) est susceptible de fournir des microstructures organiques comportant des microstructures et des spectres RAMAN similaires à ceux des microfossiles putatifs du sommet du dépôt siliceux (Brasier et al., 2002; Garcia-Ruiz et al., 2003). La composition isotopique du carbone a souvent été mise en avant en tant que critère supplémentaire d'une origine biologique des dépôts siliceux archéens (Mojzsis et al., 1996; Schidlowski, 2001). Cependant, encore une fois, cette approche a été démontrée comme non univoque puisque les processus abiotiques peuvent conduire à des fractionnements similaires (Horita and Berndt, 1999; Van Zuilen et al., 2002; McCollom and Seewald, 2006). Plus récemment, la grande diversité de caractères morphologiques des stromatolithes du dépôt siliceux de Strelley Pool et la continuité d'enregistrements de matière carbonatée dans les roches datées de 3 milliards d'années a suggéré que la plus grande partie de la matière organique (OM) de ces roches a été produite par des organismes vivants (Allwood et al., 2006; Tice and Lowe, 2006).

Un nouveau critère sous la forme d'un biomarqueur indiscutable est donc nécessaire pour trancher le débat sur quand la vie est apparue pour la première fois sur Terre. Des biomarqueurs caractéristiques des cyanobactéries ont été enregistrés dans la fraction organique soluble des schistes vieux d'environ 2,7

milliards d'années du bassin de Hamersley en Australie (Brocks et al., 1999). Cependant la preuve tirée de la matière organique soluble se discute puisqu'il existe différentes sources potentielles de contamination après dépôt, notamment l'activité biologique sous la surface et la pénétration d'eau en provenance du terrain. Bien que de tels problèmes aient été soigneusement évalués dans le cas des "schistes" du bassin de Hamersley (Brocks et al., 1999), la synchronisation entre la formation de fossiles moléculaires solubles le rocher hôte reste difficile à démontrer (Brocks et al., 2003a; Brocks et al., 2003b). Par contraste, il est généralement accepté que la matière insoluble macromoléculaire caractérisée par des liaisons covalentes est de même genèse que le rocher hôte, d'où un intérêt croissant pour cette fraction organique (Brocks et al., 2003a; Marshall et al., 2006; Marshall et al., 2007). C'est pourquoi nous avons isolé le kérogène du dépôt siliceux du degré métamorphique le plus bas du Groupe Warrawoona et nous avons investigué sa structure chimique en utilisant une combinaison d'outils spectroscopiques et pyrolytiques.



# *Morphogenesis and Embryogenesis*

Martine Ben Amar, UPMC & ENS

Pasquale Ciarletta, UPMC

Martin Mueller, Univ. de Metz

Julien Dervaux, Rockefeller University (NY,USA)

Fei Jia Tsin Hua (Beijing)

Miguel Trejo (ESPCI)

Yves Couder, MSC (Univ. Paris Diderot)

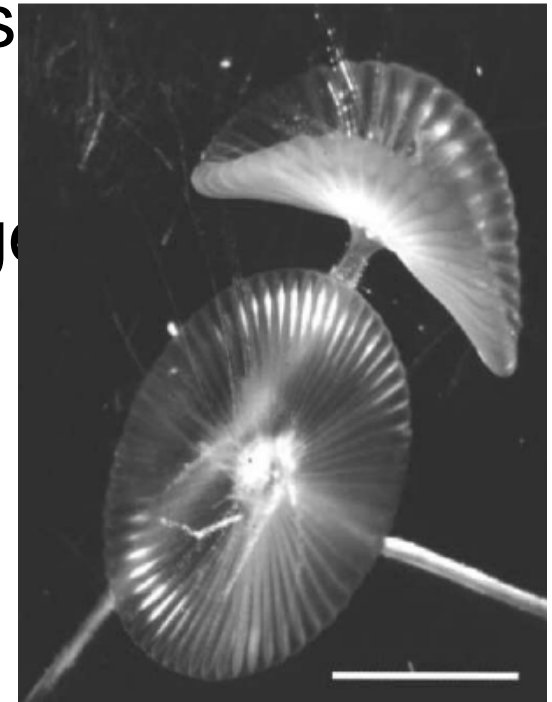
Michel Labouesse, Strasbourg



# INTRODUCTION: Growth of soft elastic tissue

- ✓ Shape of living systems controlled by GROWTH AND ELASTICITY
- ✓ Some examples in morphogenesis
- ✓ Skin and villi formation in embryogenesis
- ✓ Tumor growth

Green algae: Serikawa and Mandoli, *Planta* 98



# Why do volumetric growth induce complicated shapes ?

- ✓ Growth process is space-dependent
- ✓ Growth concerns anisotropic tissues
- ✓ Growth is constrained by boundary conditions
- ✓ Physical model for growth of biological tissues  
Swelling gels



MBA, Mueller  
and Trejo, NJP  
2012

# Why growth induced complicated shape?

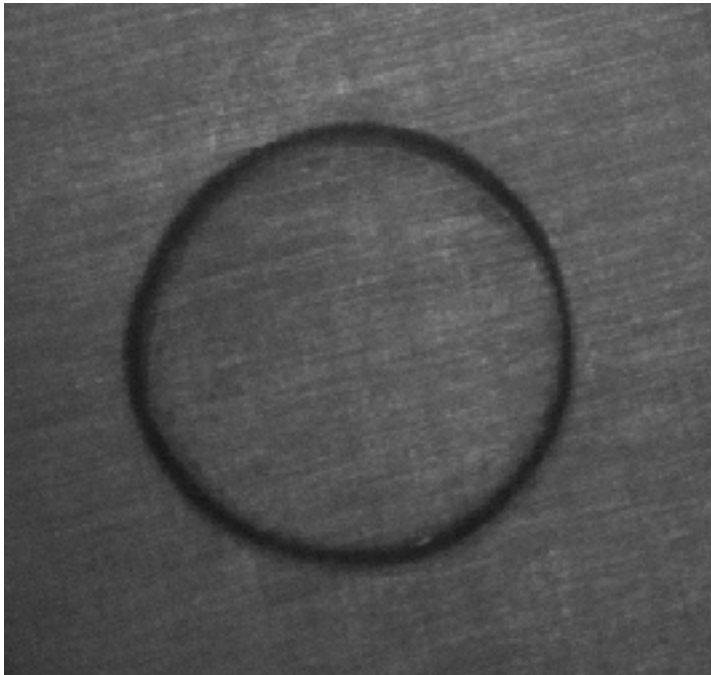
Tanaka geometry (Nature 1987)



MBA and Ciarletta, JMPS 2010

# Why growth induced complicated shape?

Julien Dervaux, M.A. Goudeau, MBA, Yves Couder  
J.Dervaux and MBA (2011)

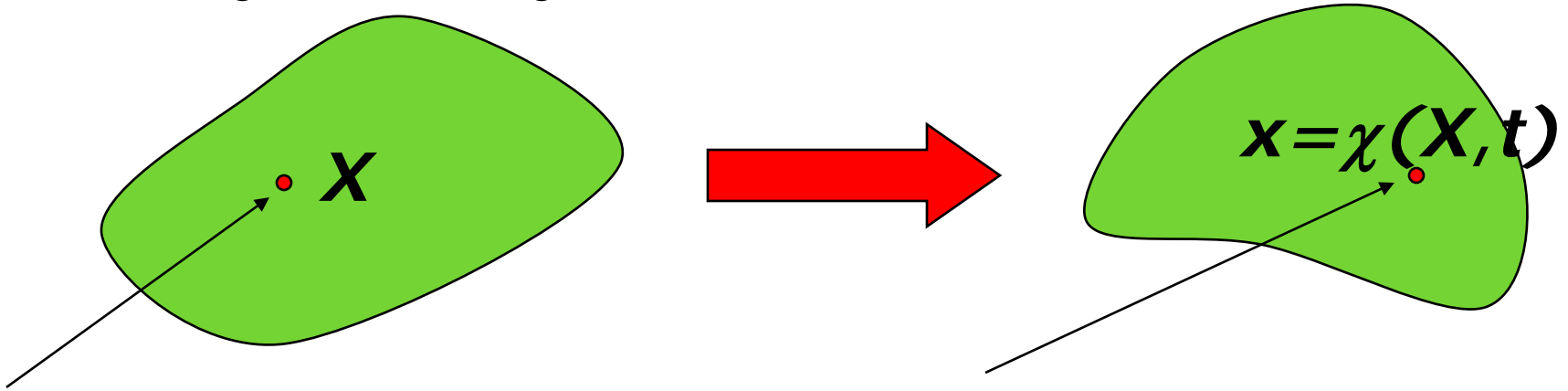


# THEORETICAL MODELS FOR GROWTH

- ✓ **Volumetric growth model**: finite elasticity, of hyper-elastic material  
(Neo-hookean)
- ✓ Description of biological process
- ✓ Analytical treatment: minimum of an elastic energy
- ✓ Patterns: bifurcation from a highly symmetric state towards a less symmetric one but also less energetic
- ✓ Bifurcation: control parameter is the local growth function of time  
buckling, post-buckling
- ✓ We have introduced a “**stream function**” in nonlinear elasticity

# Elastic growth: Strains

Let  $\mathbf{X}$  be a reference configuration of an elastic body and  $\mathbf{x}$  the current configuration after growth.



$\mathbf{F} = \text{Grad}(\chi)$  be the **geometric** deformation tensor.

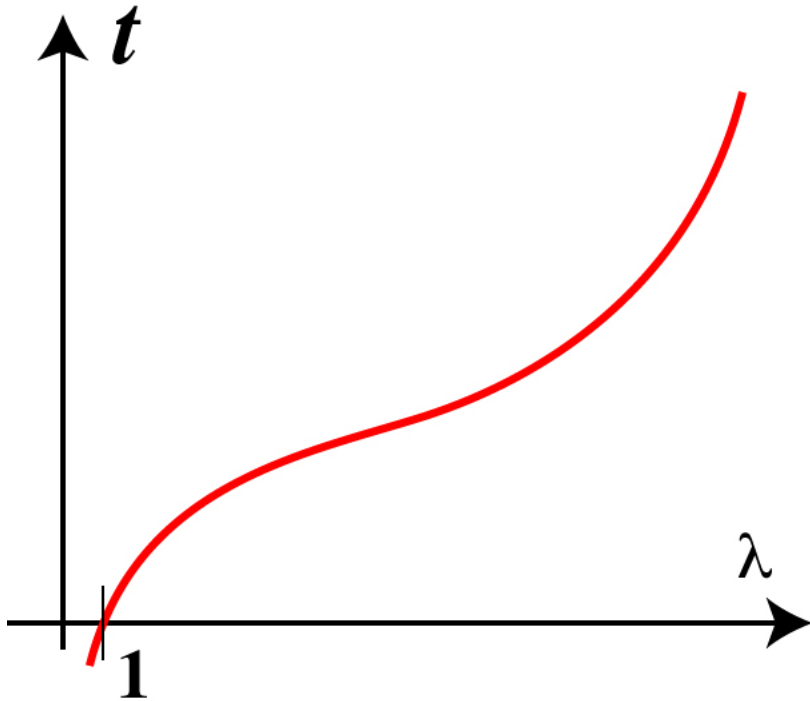
$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{G}$$

Main assumption: Rodriguez, Hoger, Slalak decomposition (93)

where  $\mathbf{G}(\mathbf{r}, t)$  and  $\mathbf{F}_e(\mathbf{r}, t)$  are, the **growth** and **elastic deformation** tensor.

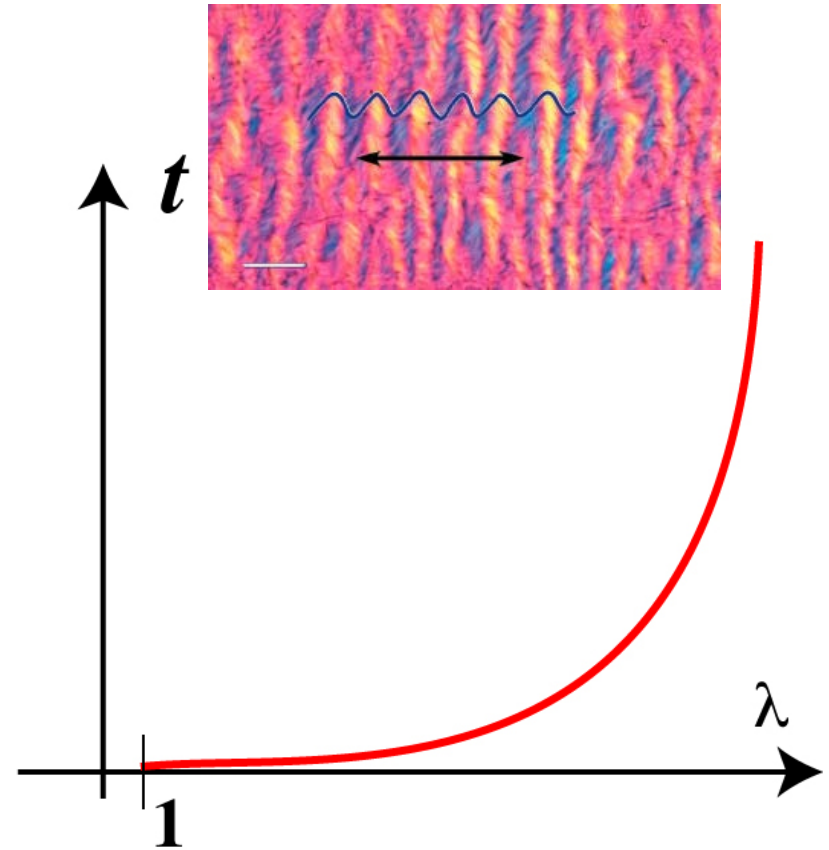
# Energy

Uniaxial testing.  $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$



Rubber, Ogden

$$W = \sum_{p=-\infty}^{\infty} a_p (\lambda_1^p + \lambda_2^p + \lambda_3^p - 3)$$



Soft-tissues, Fung

$$W = \frac{1}{a} (e^{a(I_1-3)} - 1)$$

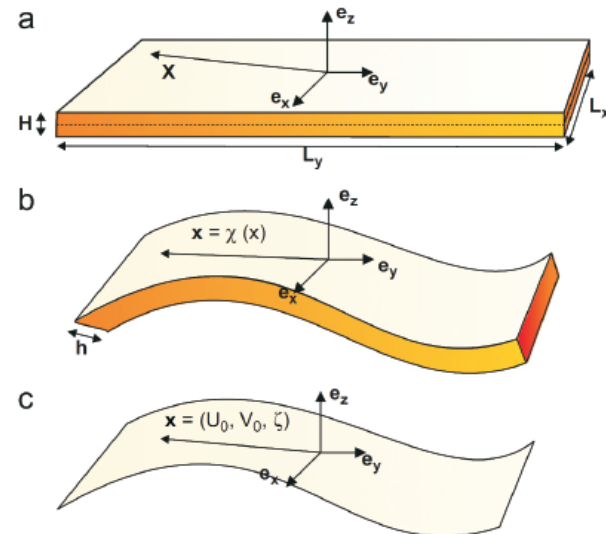
# Thin elastic tissues: THE FvK equations

✓  $h \rightarrow 0$ , asymptotic analysis from 3D elasticity to 2D (lubrication theory) and determination of the geometry of the neutral surface.

Advantage: Transform tensorial formalism into EDP

$$\varepsilon = \frac{h}{L} \rightarrow 0$$

$$\varepsilon = \frac{h}{L} \ll \frac{\zeta}{L} \ll 1$$



6 - Schéma illustrant les notations pour la déformation d'une plaque mince.



# ELASTIC ENERGY

$$E \approx Yh^3 \iint dS (\Delta \zeta)^2 + Yh \iint dS \Delta \Xi^2$$

Buckling  $\zeta$  and Stretching  $\Xi$

$$E_{nerg} \approx Yh^3 \frac{\zeta^2}{L^2} + Yh \frac{\zeta^4}{L^2}$$

**source of curvature**

**Flexion**

**coupling  
flexion / traction**

$$D(\Delta^2 \zeta - \Delta g(\zeta_0) - 2h[\chi, \zeta]) = P$$

$$\Delta^2 \chi + E([\zeta, \zeta] - [\zeta_0, \zeta_0]) = 0$$

**traction**

**Gaussian  
curvature**

**source of  
Gaussian  
curvature**

$$[\chi, \zeta] = \partial_{xx}^2 \chi \partial_{yy}^2 \zeta + \partial_{yy}^2 \chi \partial_{xx}^2 \zeta - 2\partial_{xy}^2 \chi \partial_{xy}^2 \zeta$$

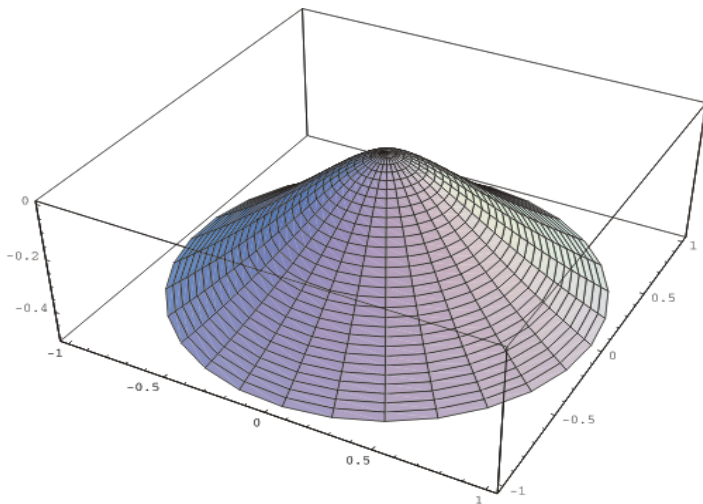
# Green Algae

Anisotropic growth of a disc of radius  $R$

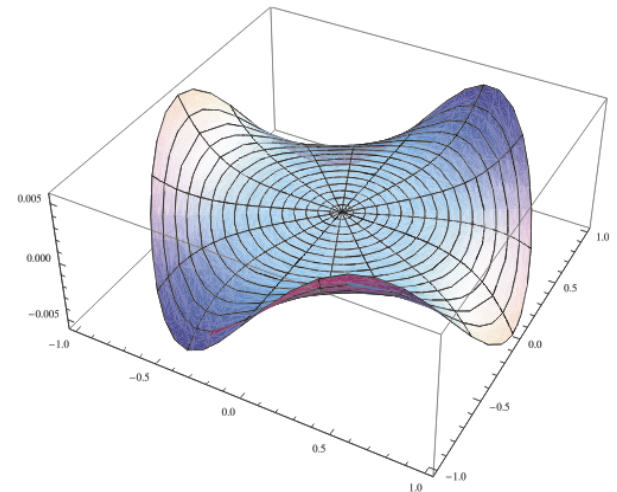
$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1+g_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1+g_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\alpha = 6(g_2 - g_1) \frac{R^2}{H^2}$$

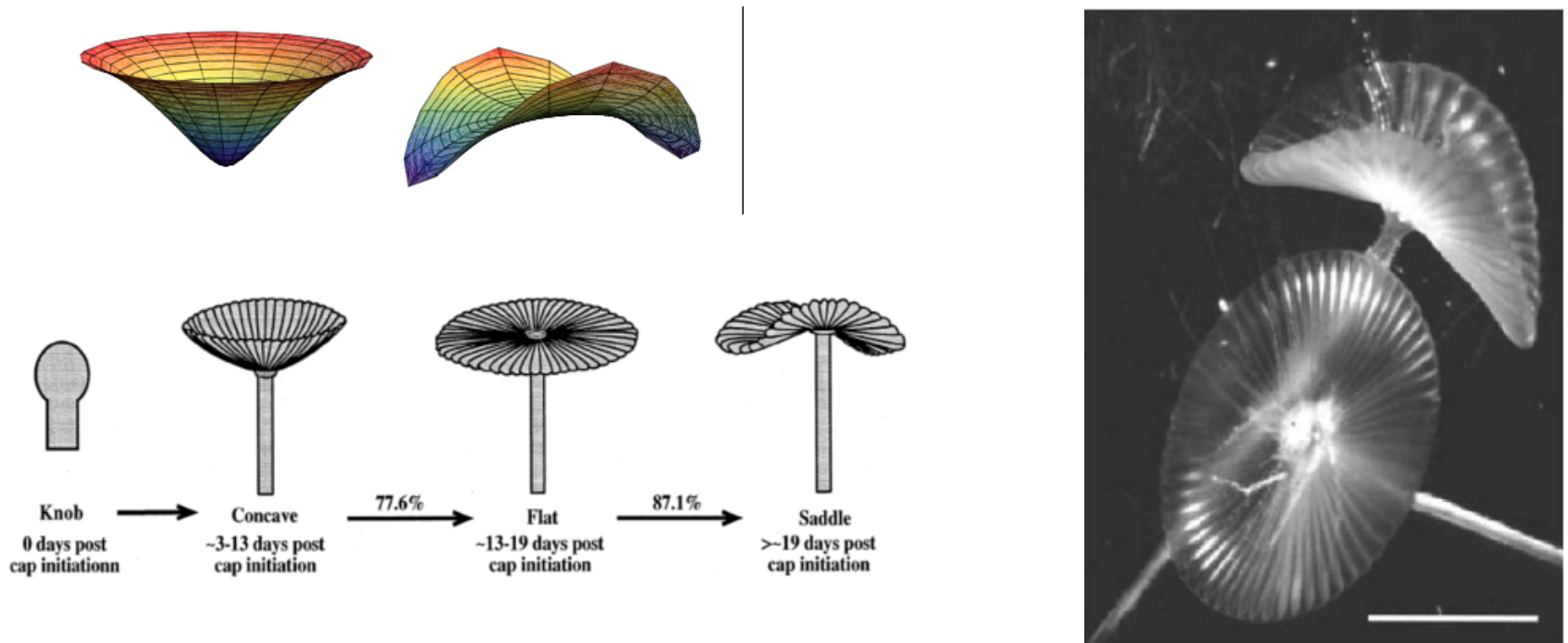
$\alpha$  negative



$\alpha$  positive



# Morphogenesis of the green algae



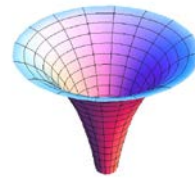
From Serikawa and Mandoli, *Planta* (97)  
Model: Dervaux and Ben Amar, PRL 08

# Sympetalous flower morphogenesis



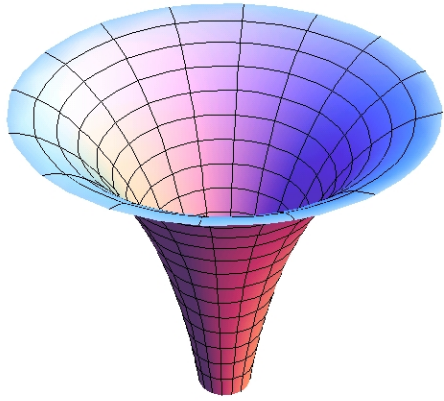
Brugmansia,  
Marocco

Surfinia,  
Paris



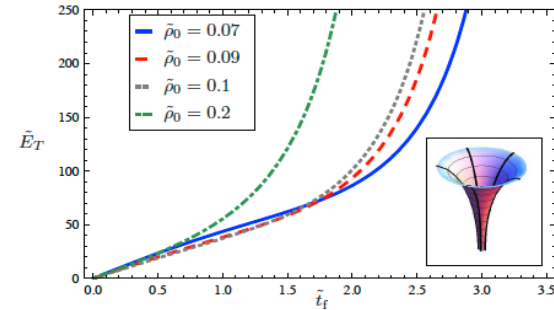
Datura,  
Sicily

# Flowers with constant negative curvature



- With the pseudo-sphere, in our model no **stretching** so **bending** only. **Divergence** of the bending term at the singularity.
- Regularization via undulations. We have checked!!!

$$E_B = \int du ds \sqrt{g} \left( \frac{\kappa}{2} K^2 + \bar{\kappa} K_G \right)$$



- Agreement obtained after introduction of nerves: 5.
- Nerves  $\longrightarrow$  bent and soft filaments
- Also we construct « nearby » not axi-symmetric surface  
At  $t=0$   $R = R_0 [1 + a \cos(n\theta)]$

The axi-symmetric solution is preferred by the «bending» energy .

# Definition of a non-linear stream function

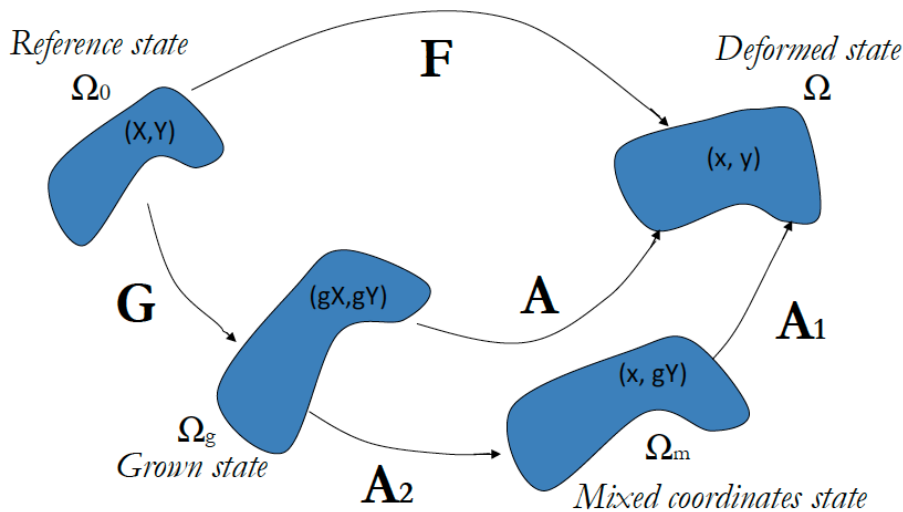
- Area preserving diffeomorphisms admit canonical transformations of the coordinates which conserve the form of the hamiltonian

$$\frac{\partial y}{\partial X} - \frac{\partial x}{\partial Y} = g^{-2} \quad \text{SO}$$

$$\Psi(x, Y)$$

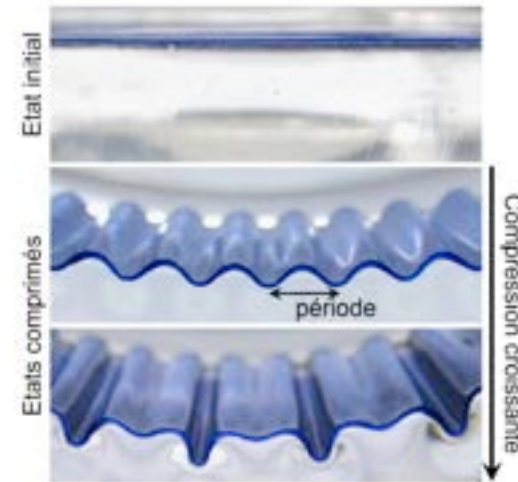
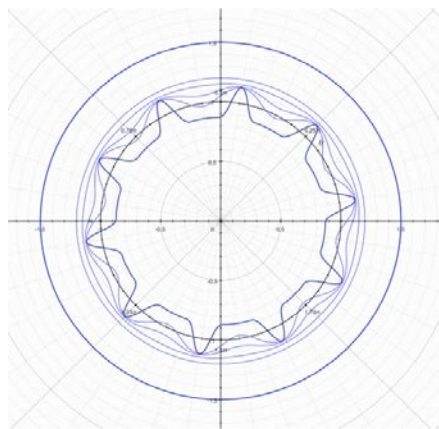
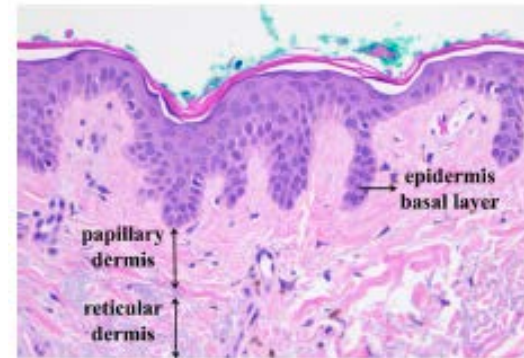
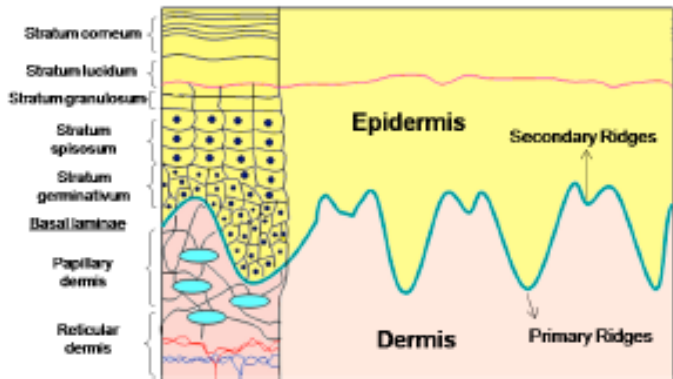
$$X = \frac{1}{g^2} \frac{\partial \Psi}{\partial Y}(x, Y) = g^{-2} \Psi_Y$$

$$y = \frac{\partial \Psi}{\partial x}(x, Y) = \Psi_x$$



- M Carroll (2004)
- A representation for volume preserving transformations
- Bateman exercise
- Gauss
- P. Ciarletta and M. BA

# Growth instabilities in biomechanics: dermal-epidermal junction



Ciarletta and MBA  
nonlinear mech.2012

Damman and Boudaoud  
et al, Nature phys. 2010



# Growth and Elastic models

– Energy:

$$F = F_e F_g \rightarrow C_e = F_e^T F_e$$

$$E = E_e + E_{ani} = J[c_{iso} (C_e : I - 3) + \sum_{j=x,y} k_j (C_e + C_e^{-1} - 2I : e_j \otimes e_j)]$$

Ciarletta et MBA, MRS 2012

- ✓ Elastic models different from the epidermis (epithelial tissue) and dermis: different coefficients and different thickness and introduction of fibers (dermis)
- ✓ Growth which can be added selectively either epidermis or dermis.
- ✓ Surface energy at the interface between epidermis/dermis to mimic a thin elastic layer: the basal membrane of 1  $\mu\text{m}$ .

$$\checkmark \gamma: 0.12-1.32 \text{ N}/\mu\text{m} \quad C_1: 0.49-1.51 \text{ Mpa} \quad C_2: 0.4-1.3$$

# Growth model: growth in the dermis

- ✓ One growing layer (dermis) attached to “a substrate” with thickness  $H_d$
- ✓ Threshold  $g^* = 1.501$
- ✓ Threshold  $g^* = 1.8392$  for strong fiber reinforcement
- ✓  $\lambda$  is of order  $1.82 H_d$  (regularization by surface energy)

$$\lambda = \frac{4\sqrt{2}H_d}{\text{Log} \left[ \frac{\tau H_d}{d_{cap}} \right]}$$

# Patterning as a variational problem

$$\phi_{YYYY} + g^4 \phi_{xxxx} + (g^4 + 1) \phi_{xxYY} = 0$$

$$g^* = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} (19 - 3\sqrt{33})^{1/3} + \frac{1}{3} (19 + 3\sqrt{33})^{1/3}$$

$$g_{th} \approx g^* + 0.15460 \text{Log} \left[ \frac{32.2462}{d_0} H_d \right]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \approx -\frac{1}{2} \text{Log} [g - g^*]$$

$$\lambda = 4\pi H / \text{Log} \left[ \frac{32.246}{d_0} H_d \right]$$

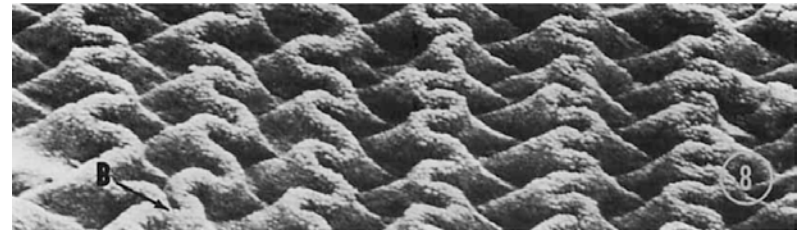
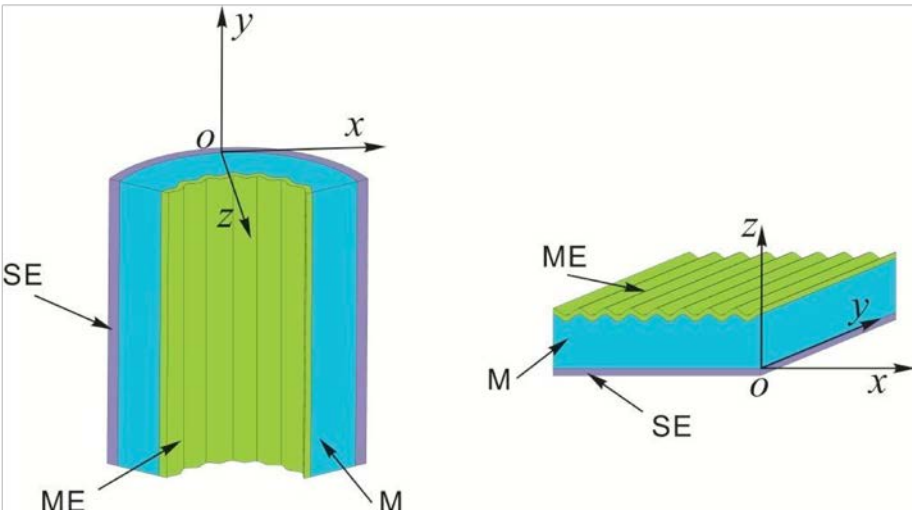
# Growth model for a bilayer

- ✓ One growing layer (epidermis) attached to “a substrate” with thickness  $H_d \ll H_e$
- ✓ Threshold  $g^* = g_c + 0.8719 C_d/C_e$
- ✓  $\lambda = 5.62 H_d$  (before  $1.82 H_d$  ( no regularization by surface energy!!!!))
- ✓ One growing layer (dermis) under a soft epidermis:  
 $H_d \ll H_e$ .

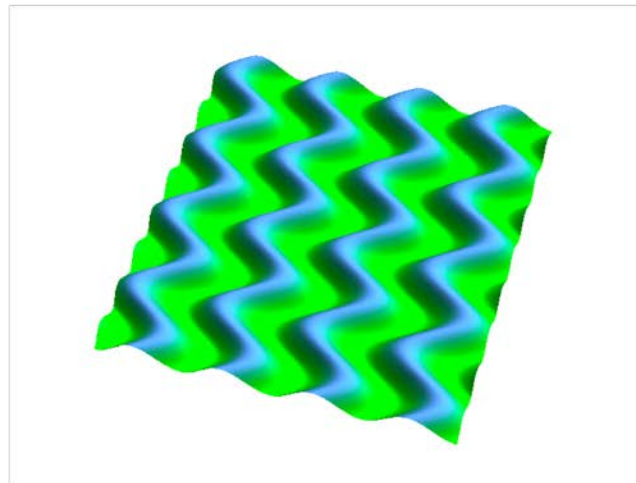
Threshold:  $g^* = g_c + 0.1445 (d_0/H_d) \cdot \text{Log}(1.527 H_d/d_0)$

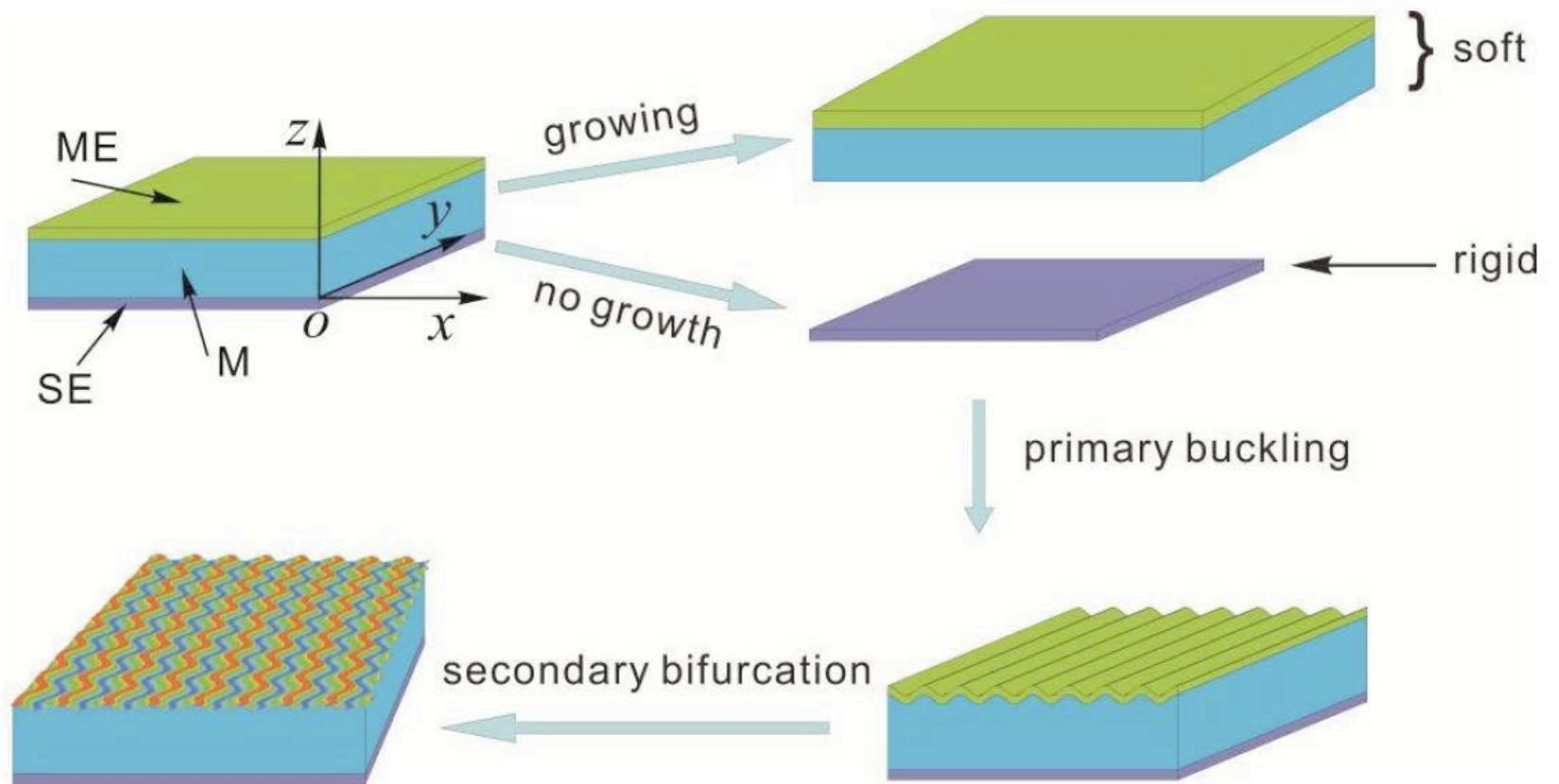
Wavelength:  $\lambda = 4 \pi H_d / \text{Log}() = 1.84 H_d$

# Previlli and villi formation with Fei Jia

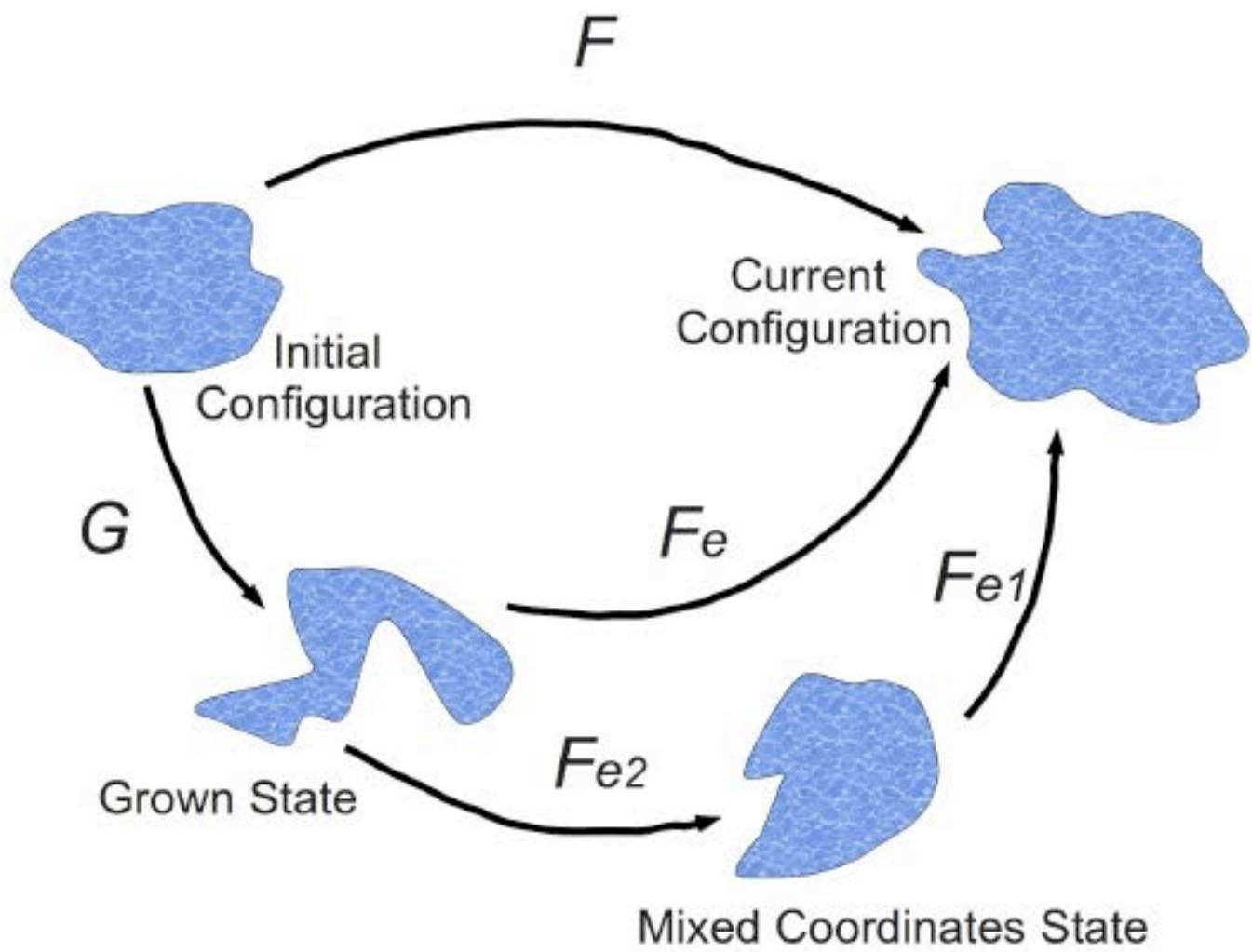


Gray (1980)





**Fig. S.1.** Schematic growing layer with a primary buckling instability followed by a zigzag secondary instability. **M** means the mesenchyme, **ME** the mucosal epithelium, **SE** the serosal epithelium.



# Strains in the mixed coordinate systems

$$X = \frac{\partial^2 \Phi(x, y, Z)}{\partial x \partial Z} = x + \epsilon \frac{\partial^2 \phi(x, y, Z)}{\partial x \partial Z}$$
$$Y = \frac{\partial^2 \Phi(x, y, Z)}{\partial y \partial Z} = y + \epsilon \frac{\partial^2 \phi(x, y, Z)}{\partial y \partial Z}$$

$$G = (g_1, g_2, g_3)$$

$$J = \det(G) = g_1 g_2 g_3$$

$$z_{,Z} = J(X_{,x}Y_{,y} - X_{,y}Y_{,x}) = J\{1 + \epsilon(\phi_{,xxZ} + \phi_{,yyZ}) - \epsilon^2(\phi_{,xyZ}^2 - \phi_{,xxZ}\phi_{,yyZ})\}$$
$$\Rightarrow z = J\{Z + \epsilon(\phi_{,xx} + \phi_{,yy}) - \epsilon^2 \int^Z \phi_{,xyZ}^2 - \phi_{,xxZ}\phi_{,yyZ} d\eta\}$$



# Strains in the mixed coordinate systems

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{F}_{e1} \cdot \mathbf{F}_{e2}$$

$$\mathbf{F}_{e1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ z_{,x} & z_{,y} & z_{,z} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_{e2}^{-1} = \begin{bmatrix} g_1 X_{,x} & g_1 X_{,y} & g_1 X_{,z} \\ g_2 Y_{,x} & g_2 Y_{,y} & g_2 Y_{,z} \\ 0 & 0 & g_3 \end{bmatrix}$$

$$\Pi = \int_{\bar{V}} W(\mathbf{F}_e) \det(\mathbf{F}_{e1}) d\bar{V} + \sigma \int_{\bar{S}} \sqrt{1 + z_{,x}^2 + z_{,y}^2} dS$$

$$W(\mathbf{F}_e) = \mu/2 (\mathbf{C} : \mathbf{I} - 3), \quad \mathbf{C} : \text{Cauchy-Green tensor}$$

# Folding: Threshold and wavelength at threshold

$$\phi = \sin(kx) H(z)$$

$$(\lambda_1^2 \lambda_2^2) h(Z) - (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) h''(Z) + h^{(4)}(Z) = 0$$

$$\lambda_1 = g_1 g_2 g_3 k \quad \text{and} \quad \lambda_2 = g_3 / g_1 k$$

$$\gamma_c = g_1^2 g_2 \quad k_c = \frac{1}{2} \frac{g_1}{g_3} \text{Log} \frac{A}{d_0} \quad A = \left( \frac{2g_3(1 + \gamma_c)(1 + 3\gamma_c^2)}{g_1^3(\gamma_c^2 - 1)} \right)$$

# Post-buckling, zig-zag, threshold and wavelength at threshold

$$\phi(x, y, Z) = \sin(k_1 x - F(y, Z))h(Z) \quad F(y, Z) = \epsilon_2 \sin(k_2 y)f(Z)$$

$$\Rightarrow (\xi_1^2 \xi_2^2)H(Z) - (\xi_1^2 + \xi_2^2)H^{(2)}(Z) + H^{(4)}(Z) = 0$$

$$\xi_1 = g_1 g_2 g_3 \sqrt{k_1^2 + k_2^2}, \quad \xi_2 = \frac{g_3 \sqrt{g_2^2 k_1^2 + g_1^2 k_2^2}}{g_1 g_2}$$

$$\gamma_c = g_1^2 g_2 \quad k_c = \frac{1}{2} \frac{g_1}{g_3} \text{Log} \frac{A}{d_0} \quad A = \left( \frac{2g_3(1 + \gamma_c)(1 + 3\gamma_c^2)}{g_1^3(\gamma_c^2 - 1)} \right)$$

$$\mathcal{J} = g_1^2 g_2 = \gamma_c \sqrt{1 + (r_g^2 - 1) \sin^2 \theta}, \quad \text{and} \quad k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} = \gamma_c \text{Log}(A/d_0)/2J.$$

# Conclusions

Cusp formation

Torsion



J.Dervaux et al, PRL 2011



# Conclusions



P. Ciarletta

J. Dervaux

M Mueller



Fei Jia

# Loi de Hooke

La **loi de Hooke** est une loi de comportement des solides soumis à une déformation de faible amplitude. C'est une loi élastique linéaire.

## Sommaire

- 1 Historique
- 2 Matière soumise à de la traction/compression
- 3 Cisaillement
- 4 Loi de Hooke généralisée
  - 4.1 Cas général
  - 4.2 Matériau isotrope
- 5 Utilisation culturelles
- 6 Articles comexes

## Historique

Cette loi de comportement a été énoncée par Robert Hooke, par la phrase en latin :

*ut tensio sic vis* (en 1678 ; expériences datant de 1675)

ce qui signifie « telle extension, telle force », ou bien en termes modernes « l'allongement est proportionnel à la force ». Hooke désirait obtenir une théorie des ressorts, en soumettant ces derniers à des forces croissantes successives.

## Matière soumise à de la traction/compression

Le mode de déformation le plus simple est la traction (étirement) ou la compression selon un axe. Pour de petites déformations, la variation de longueur  $\Delta \ell$  est proportionnelle à la force de traction/compression  $\mathbf{F}$  :

$$\Delta \ell \propto F$$

que l'on écrit plus volontiers

$$F = k \times \Delta \ell$$

où  $k$  est la raideur de la pièce. C'est en fait la loi des ressorts.

Afin de s'abstraire de la forme de la pièce, et notamment de ses dimensions, on divise la force  $\mathbf{F}$  par l'aire  $S$  de la section droite de la pièce, on appelle ce ratio *contrainte*, il est notée  $\sigma$ . La contrainte est une grandeur homogène à une pression et s'exprime en Pa.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

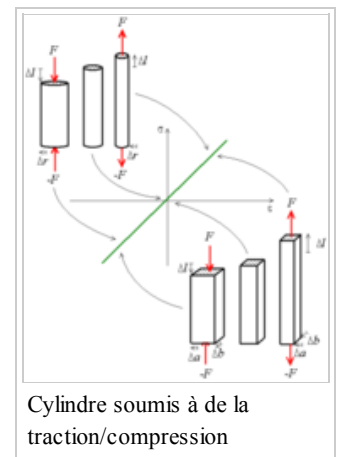
et on divise l'allongement  $\Delta \ell$  par la longueur initiale  $\ell_0$ , grandeur que l'on appelle *déformation* ou *allongement relatif*  $\varepsilon$  (sans dimension)

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0}$$

La loi de Hooke s'exprime alors sous la forme :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

où  $E$  est le module de Young, une caractéristique du matériau ; c'est l'équivalent en mécanique des milieux continus de la raideur d'un ressort.



Cylindre soumis à de la traction/compression

Cette loi est valable pour l'étirement ou la compression d'une pièce, les autres dimensions étant libres de s'étendre.

#### Unités utilisées

Grandeur	uSI	Unités conventionnelles
$\sigma$	Pa	kPa, MPa, GPa
$E$	Pa	MPa, GPa
$\epsilon$	1	%

De sa loi deux aspects sont importants :

1. La linéarité,
2. L'élasticité.

Ces deux aspects ne sont pas identiques, la linéarité exprime « l'allongement est proportionnel à la force », l'élasticité exprime que cet effet est réversible et permet donc de revenir à l'état initial tel un ressort soumis à de faibles forces. L'élasticité a une limite, qui est indépendante de la notion de linéarité, Hooke n'a considéré que la phase élastique et linéaire, donc proportionnelle et réversible.

La linéarité provient du fait que l'on est en faible déformation, on peut donc faire une approximation linéaire de la loi réelle (développement limité au premier ordre). Il s'agit en fait d'approcher le potentiel interatomique par une parabole, voir l'article *Déformation élastique* > *Pourquoi les lois sont-elles linéaires ?*.

Dans le cas d'une pièce de forme complexe, la loi de déformation globale n'a aucune raison d'être linéaire, mais par contre, chaque élément infinitésimal de matière se déforme lui de manière linéaire.

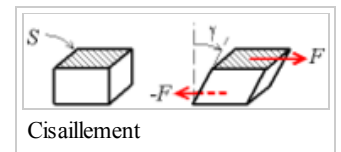
## Cisaillement

La loi de Hooke est une loi de déformation en traction/compression ; cependant, en cisaillement, on a une loi similaire :

$$\tau = G \times \gamma$$

où

- $\tau$  est la cission (contrainte de cisaillement) ;
- $G$  est le module de cisaillement ou module de Coulomb, également noté  $\mu$  ;
- $\gamma$  est l'angle de déformation relative.



Cisaillement

#### Unités utilisées

Grandeur	uSI	Unités conventionnelles
$\tau$	Pa	MPa
$G$	Pa	MPa, GPa
$\gamma$	rad	°

Article détaillé : Déformation élastique#Cisaillement.

## Loi de Hooke généralisée

Si l'on s'intéresse à un petit élément de matière subissant de petites déformations, alors sa loi de déformation est linéaire et réversible quelle que soit la sollicitation. On peut donc généraliser la loi de Hooke, en l'exprimant sous une forme matricielle. On définit la contrainte et la déformation localement par un tenseur 3×3, le tenseur des contraintes  $[\sigma_{ij}]$  et le tenseur des déformations  $[\epsilon_{ij}]$ .

Articles détaillés : Tenseur des déformations et Tenseur des contraintes.

## Cas général

Le comportement élastique du matériau est modélisé par un tenseur d'ordre 4  $[C_{ijkl}]$  contenant 81 coefficients élastiques. Le nombre de coefficients indépendants est réduit à 21 en tenant compte de la symétrie des tenseurs de contraintes et de déformations, et de la stabilité énergétique du tenseur. On a :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

en appliquant la sommation sur les indices (Convention de sommation d'Einstein).

Du fait de ces propriétés de symétrie, le tenseur  $C_{ijkl}$  peut être représenté sous la forme d'une matrice 6×6, où les directions représentent les directions de la déformation.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

Pour simplifier l'écriture, on adopte souvent une notation de 1 à 6, appelée notation de Voigt, avec les axes de compression/traction notés de 1 à 3 et les axes de cisaillement notés de 4 à 6.

## Matériau isotrope

Dans le cas d'un matériau isotrope, si l'on reprend en compte le coefficient de Poisson  $\nu$ , la loi de Hooke devient :

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right)$$

avec

- †  $\delta_{ij}$  le symbole de Kronecker et
- †  $\varepsilon_{kk}$  la notation abrégée de la trace du tenseur des déformations (somme des termes diagonaux du tenseur).

On peut aussi l'écrire sous forme matricielle :

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{E}{1+\nu} \left( \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{\nu}{1-2\nu} \text{Tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} \right)$$

Les relations ci-dessus peuvent être inversées pour donner :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1+\nu) \sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij}]$$

ou, sous forme matricielle (en appliquant la trace à la relation plus haut):

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{E} ((1+\nu)\boldsymbol{\sigma} - \nu \text{Tr}(\boldsymbol{\sigma})\mathbf{I})$$

La forme explicite très simple de ces relations (donnant les déformations en fonction des contraintes)

$$\left( \begin{array}{ccc} \varepsilon_{11} = \frac{1}{E} (\sigma_{11} - \nu (\sigma_{22} + \sigma_{33})) & \varepsilon_{12} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{12} & \varepsilon_{13} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{13}, \\ \dots & \varepsilon_{22} = \frac{1}{E} (\sigma_{22} - \nu (\sigma_{11} + \sigma_{33})) & \varepsilon_{23} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{23}, \\ \dots & \dots & \varepsilon_{33} = \frac{1}{E} (\sigma_{33} - \nu (\sigma_{11} + \sigma_{22})) \end{array} \right)$$

montre bien la signification physique du module d'Young  $E$  et du coefficient de Poisson  $\nu$ .

## Utilisation culturelles



*Ut tensio sic vis* est la devise de l'École Polytechnique de Montréal.

## Articles connexes

- Coefficient d'élasticité
- Plasticité et endommagement des polymères

Formules de conversion <span style="float: right;">[masquer]</span>										
Les propriétés élastiques des matériaux homogènes, isotropes et linéaires sont déterminées de manière unique par deux modules quelconques parmi ceux-ci. Ainsi, on peut calculer chacun à partir de deux d'entre eux en utilisant ces formules.										
	$(\lambda, G)$	$(E, G)$	$(K, \lambda)$	$(K, G)$	$(\lambda, \nu)$	$(G, \nu)$	$(E, \nu)$	$(K, \nu)$	$(K, E)$	$(M, G)$
$K =$	$\lambda + \frac{2G}{3}$	$\frac{EG}{3(3G-E)}$			$\frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu}$	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$			$M - \frac{4G}{3}$
$E =$	$\frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G}$		$\frac{9K(K-\lambda)}{3K-\lambda}$	$\frac{9KG}{3K+G}$	$\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	$2G(1+\nu)$		$3K(1-2\nu)$		$\frac{G(3M-4G)}{M-G}$
$\lambda =$		$\frac{G(E-2G)}{3G-E}$		$K - \frac{2G}{3}$		$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{3K\nu}{1+\nu}$	$\frac{3K(3K-E)}{9K-E}$	$M - 2G$
$G =$			$\frac{3(K-\lambda)}{2}$		$\frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu}$		$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	$\frac{3KE}{9K-E}$	
$\nu =$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$	$\frac{E}{2G} - 1$	$\frac{\lambda}{3K-\lambda}$	$\frac{3K-2G}{2(3K+G)}$					$\frac{3K-E}{6K}$	$\frac{M-2G}{2M-2G}$
$M =$	$\lambda + 2G$	$\frac{G(4G-E)}{3G-E}$	$3K - 2\lambda$	$K + \frac{4G}{3}$	$\frac{\lambda(1-\nu)}{\nu}$	$\frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}$	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{3K(1-\nu)}{1+\nu}$	$\frac{3K(3K+E)}{9K-E}$	

Ce document provient de « [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi\\_de\\_Hooke&oldid=87887680](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_de_Hooke&oldid=87887680) ».

Dernière modification de cette page le 21 janvier 2013 à 08:50.

Droit d'auteur : les textes sont disponibles sous licence Creative Commons paternité partage à l'identique ; d'autres conditions peuvent s'appliquer. Voyez les conditions d'utilisation pour plus de détails, ainsi que les crédits graphiques. En cas de réutilisation des textes de cette page, voyez comment citer les auteurs et mentionner la licence.

Wikipedia® est une marque déposée de la Wikimedia Foundation, Inc., organisation de bienfaisance régie par le paragraphe 501(c)(3) du code fiscal des États-Unis.