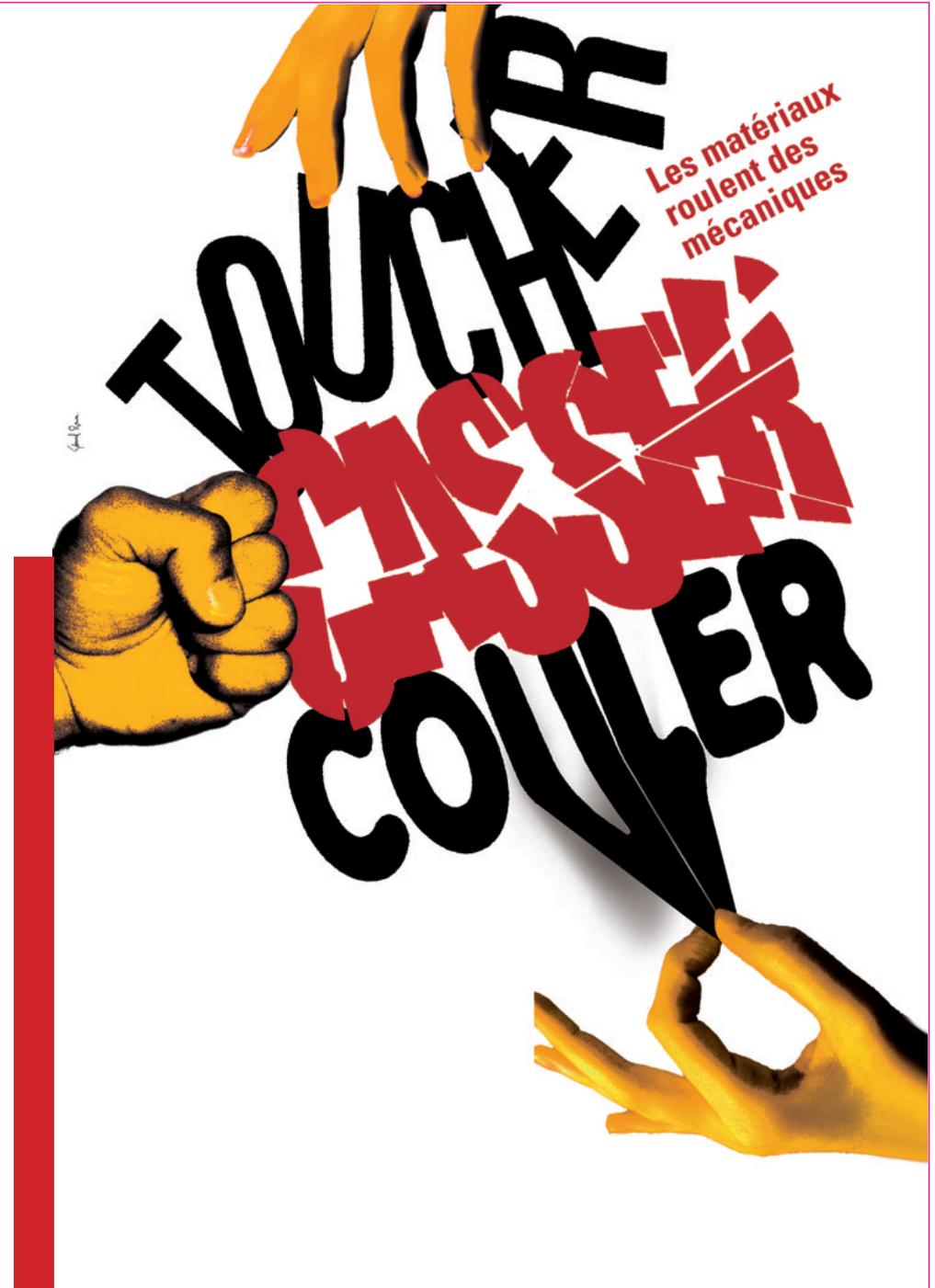
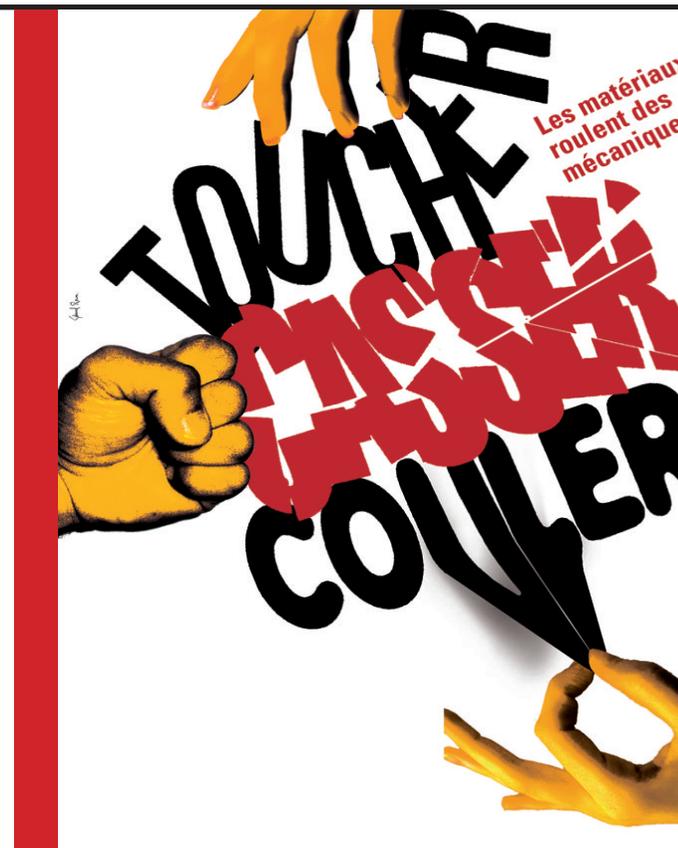


cahier de l'animateur

document
au 14/11/14



*Ce cahier est destiné
aux animateurs,
aux professeurs
et aux élèves.
Il leur permettra
d'aller plus loin dans
la compréhension
des expériences et
d'en faire d'autres,
plus simples, chez soi
ou dans la classe.*



*document
au 14/11/14*

sommaire

Présentation

Table 1 : Forces et contraintes

Table 2 : Déplacements et déformations

Table 3 : Affaiblir en pressant

Table 4 : Renforcer en tirant

Table 5 : Dur ou mou ? Une question de température

Table 6 : Solide ou liquide ? Une question de temps !

Table 7 : Dislocations et ruptures

Table 8 : Zéro défaut ?

Table 9 : Chocs et rebonds

Table 10 : Trancher, casser, broyer

Table 11 : Plisser, froisser

Table 12 : Déchirer, lacérer

Table 13 : Adhérer ou frotter

Table 14 : Des grains qui collent

Table 15 : Glisser par saccades

Table 16 : Sécher et fissurer

Présentations indépendantes

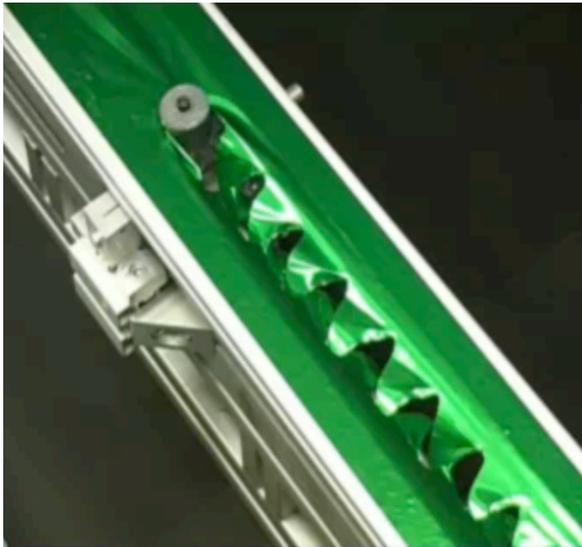
Glossaire et bibliographie



Toucher, Casser, Couler

**Les matériaux
roulent des
mécaniques**

**Exposition scientifique,
interactive et itinérante**



L'exposition qu'accompagne ce livret «**Pour aller plus loin**» parle d'un dialogue entre les changements de formes de la matière et les sollicitations – ou contraintes - auxquelles elle est soumise ; c'est celui d'une bande élastique que l'on étire avec des forces opposées et qui s'allonge sans se déplacer.

Cette exposition a été présentée en avant première au muséum d'Orléans sous le titre « Toucher, Casser, Couler ».

La relation entre déformations et contraintes dépend d'abord des matériaux : du verre ou du métal, du papier ou de la gomme, du plexiglass ou du polystyrène, une pâte ou l'écorce terrestre, le bitume ou le caoutchouc... Comment caractériser ces matériaux ? Sont-ils durs ou mous, souples ou rigides, coulants ou cassants, fragiles ou ductiles ? Comment réagissent-ils aux sollicitations mécaniques ? à la fatigue ? au vieillissement ?

Elle met en avant la diversité de ces comportements qui évoquent un liquide, un solide voire des matériaux intermédiaires.

Mais ce n'est pas suffisant pour comprendre la résistance des matériaux.

Les propriétés mécaniques de la matière dépendent d'effets de forme : celle de l'arche d'un pont ou d'une voûte ; celle d'une coquille d'œuf qui se déforme si peu sous chargement.

Bien sur, il est possible de casser cet œuf si l'on insiste... mais c'est une toute autre histoire que l'on connaît mal et dont il sera peu question dans les expériences présentées : les ruptures qui sont fonction de défauts présents aléatoirement dans la matière.

Malgré son importance dans la vie de tous les jours et la technologie, il s'agit d'un thème curieusement absent des formations de base à tous les niveaux, sauf de façon limitée en sciences de la terre. Il s'agit là d'une anomalie.

Ce vaste domaine de recherche expérimentale scientifique et technique s'appuie en particulier sur une description multi échelles (espace et temps) des phénomènes ; il connaît un large développement actuel grâce en particulier aux nombreux outils numériques récents qui permettent de réaliser des simulations ?

Il fait appel à des collaborations fortes entre équipes au plan national ainsi que dans des recherches qui dépassent les frontières disciplinaires. Ainsi, l'exposition a bénéficié des collaborations généreuses de nombreux chercheurs que nous tenons ici à remercier chaleureusement.

Enfin, ce secteur n'a pas connu au niveau muséologique le développement qu'il mérite. Nous avons souhaité que l'exposition soit une base pour ce secteur essentiel de l'étude de la matière et des matériaux.

Pour mettre en place cette nouvelle exposition totalement originale, nous avons utilisé une stratégie comparable à celle que nous avons suivie dans les expositions « Jeux de grains » et « Mosaïque de la physique ».

Ainsi plus de cinquante expériences issues de laboratoires sont présentées avec un accompagnement de panneaux sur une surface de 200 m².

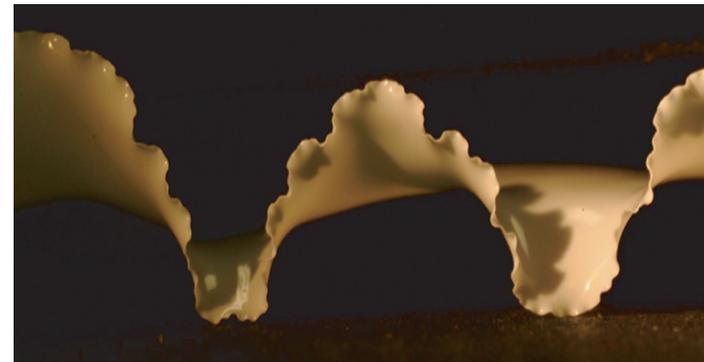
Cette exposition est destinée à un large public, et en particulier aux jeunes ; un effort important est fait pour que les explications soient compréhensibles par les collégiens et lycéens et suscite la curiosité des plus jeunes. Pour rendre l'exposition plus attractive, le visiteur est invité à manipuler lui-même, chaque fois que l'expérience s'y prête.

Les explications des phénomènes observés sont accompagnées de quelques vidéos qui montrent comment chacun des sujets trouve une résonance dans la physique actuelle, qu'il s'agisse d'applications ou de recherche fondamentale. Chaque fois que cela nous semble intéressant, nous présentons également des éléments historiques en relation avec l'expérience et nous avons essayés de montrer comment la recherche passée ou récente s'inscrit dans le temps (les questions posées, les réponses apportées, les applications...).

Les responsables de la réalisation scientifique sont :

- **Tanguy Rouxel**, professeur de mécanique à l'Université de Rennes 1 et spécialiste des matériaux solides. Il est le référent scientifique de cette exposition scientifique,
- **Etienne Guyon**, physicien de la matière à l'ESPCI, apporte une expérience pédagogique dans son travail autour des Collèges et, en particulier, à travers l'ouvrage « *Matière et matériaux ; de quoi est fait le monde* ».
- La coordination muséologique est assurée par **Centre•Sciences**, CCSTi de la région Centre (Orléans) où **Michel Darche** est le troisième membre de l'équipe scientifique de ce projet,
- La réalisation et la circulation sont assurées par **Pierre Beauvallet** pour Centre•Sciences.

Une seconde version légère est en itinérance avec **Science Action** Haute-Normandie basé à Rouen.



Réalisation scientifique

Tanguy Rouxel – Université Rennes 1
Etienne Guyon – ESPCI - ParisTech
Michel Darche – Centre•Sciences - CCSTi région Centre

Comité scientifique

Daniel Bideau – Université Rennes 1
Christiane Caroli – Université Paris VI
Etienne Guyon – ESPCI - ParisTech
Jean-Baptiste Leblond – Université Paris VI
André Pineau – Ecole des Mines de Paris - Corbeil
Yves Pomeau – ENS Paris
Stéphane Roux – ENS Cachan
Pierre Suquet – Lab.de Mécanique et d'Acoustique - Marseille
Henri Van Damme – IFSTTAR - Nantes-Bouguenais

Réalisation

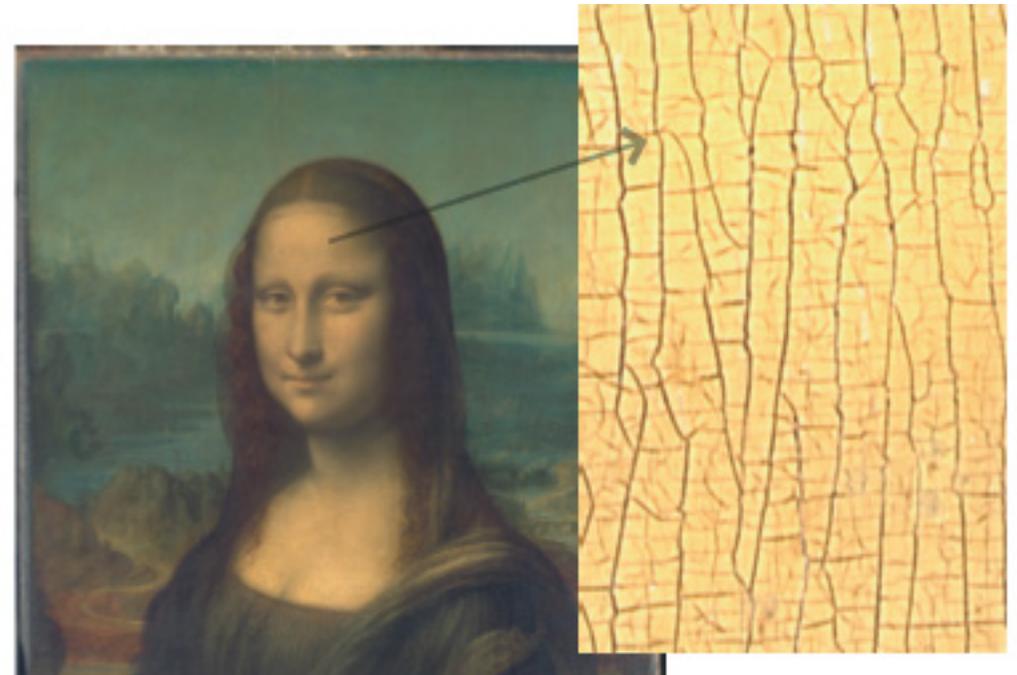
Scénographie : Centre•Sciences & Samuel Roux
Graphisme : Samuel Roux (Orléans)
Impression numérique : API (St Denis en Val – Loiret)
Expériences & modèles : Centre•Sciences &
Atelier 3D 41 (Pray – Loir et Cher),
Mobilier : BCF (Jouy-le-Pothier - Loiret)

Exposition conçue et réalisée par

Centre•Sciences, CCSTi de la région Centre - Orléans

Et coproduite avec

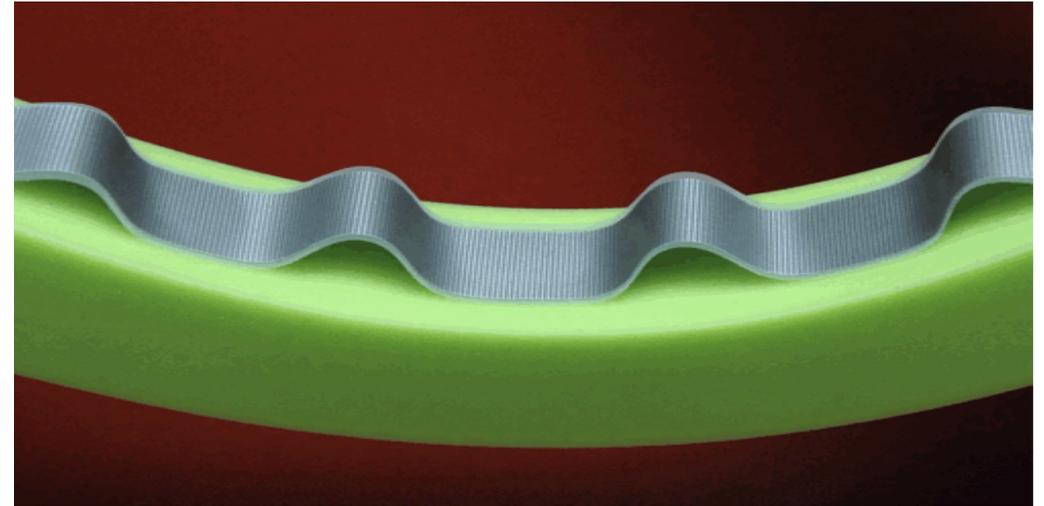
Universcience – Palais de la découverte
et Science @ction Haute-Normandie - Rouen



Ce livret a été réalisé principalement par :
Pierre Beauvallet, Michel Darche, Etienne Guyon, Serge Mora et Tanguy Rouxel

avec la complicité de chercheurs des laboratoires :

- CEA-SACLAY : Daniel Bonamy (Equipe Fracture SPCSI)
Stéphane Marie, Grégory Pérez (LISN)
François Daviaud (Groupe Instabilités et Turbulences)
- CNRS/Saint Gobain-CEA-Saclay : Davy Dalmas
- Ecole Polytechnique : Charles Baroud (LadHyX)
- Ecole Polytechnique de Tours : Arayanaswami Ranganathan (LMR)
- ENS Lyon : Jean-Christophe Gémard (Lab. de physique), Arezki Boudaoud (RDP)
- ESPCI ParisTech : José Bico, Benoît Roman, Etienne Reyssat, Benjamin Thiria (PMMH)
- IFSTTAR : Henri Van Damme, Ferhat Hammoum, Gilles Didelet (Dt Matériaux)
- Université de Lyon 1 : Anne Tanguy, Tristan Albaret, Loïc Vanel (LPMCN)
- Université de Montpellier / CNRS : Christian Ligoure, Serge Mora (L2C)
- Université d'Orléans & CNRS : Marie-Louise Saboungi (CRMD)
- Université Paris-VI : Tristan Baumberger, Christiane Caroli, Olivier Ronsin (INSP)
- Université Paris-Sud : Patrice Jenffer & Véronique Lazarus, Ludovic Pauchard, Harold Auradou (FAST)
- Université de Rennes 1 : Tanguy Rouxel, JC Sanglebœuf (LARMAUR)
Daniel Bideau, Renaud Delannay (GMCM)
Jean-Pierre Brun (CAREN-Laboratoire Géosciences)
- Saint-Gobain Recherche : René Gy, Frédéric Barrières
- Michelin – Clermont-Ferrand
- PSA Peugeot Citroën : Laurent Rota
- Massachusetts Institute of Technology : Pedro Reis (EGSL)
- Université de Santiago du Chili : Francisco Melo (LPNL)



CAREN : Centre Armoricaain de Recherches en ENvironnement

CRMD : Centre de Recherche sur la Matière Divisée

EGSL : Elasticity, Geometry & Statistics Laboratory

ESPCI : École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles

FAST : Laboratoire Fluides, Automatique et Systemes Thermiques

GMCM : Groupe Matière Condensée et Matériaux

IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

INSP : Institut des NanoSciences de Paris

LARMAUR : Laboratoire de Recherche en Mécanique Appliquée

LISN : Laboratoire d'Intégrité des Structures et de Normalisation

L2C : Laboratoire Charles Coulomb

LMR : Laboratoire de Mécanique et de Rhéologie

LPMCN : Laboratoire de physique de la matière condensée et nanostructures

LPNL : Laboratoire de Physique Non Linéaire

PMMH : Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes

SPCSI : Service de Physique et Chimie des Surfaces et Interfaces

les 16 tables et leurs expériences

Presser, tirer, tordre, courber... toutes ces actions mécaniques sollicitent les matériaux et les déforment.

Robert Hooke a laissé son nom à la loi de l'élasticité linéaire valable lorsque **les forces** exercées sur un solide ne sont pas trop grandes. En particulier quand la force s'annule, la déformation s'annule aussi.

Lorsqu'on appuie sur une surface, le quotient entre la force appliquée et l'aire de la surface de contact est appelé **contrainte**. Il s'exprime en unité de pression, le pascal, c'est-à-dire en newton par mètre carré.

Le poids d'un éléphant et celui d'un être humain sont bien différents. La surface importante de la patte de l'éléphant permet néanmoins de limiter la contrainte au contact du sol. A l'inverse, un talon aiguille engendre une contrainte élevée et en fait l'ennemi des parquets ; en comparaison, la déformation causée par une patte d'éléphant est bien modeste !

1

Presser, tirer, tordre, courber... toutes ces actions mécaniques sollicitent les matériaux et les déforment.

Robert Hooke a laissé son nom à la loi de l'élasticité linéaire valable lorsque **les forces** exercées sur un solide ne sont pas trop grandes. En particulier quand la force s'annule, la déformation s'annule aussi.

Lorsqu'on appuie sur une surface, le quotient entre la force appliquée et l'aire de la surface de contact est appelé **contrainte**. Il s'exprime en unité de pression, le pascal, c'est-à-dire en newton par mètre carré.

Le poids d'un éléphant et celui d'un être humain sont bien différents. La surface importante de la patte de l'éléphant permet néanmoins de limiter la contrainte au contact du sol. A l'inverse, un talon aiguille engendre une contrainte élevée et en fait l'ennemi des parquets ; en comparaison, la déformation causée par une patte d'éléphant est bien modeste !

" Ut tensio sic vis " énonçait en 1676 Robert Hooke, un contemporain de Newton ; ce qu'on peut traduire par " La déformation varie comme la force " .

Forces et contraintes



• Diamètre d'un pied d'éléphant : 40 cm, poids : 5 tonnes, soit une pression 10 fois plus faible que sous un talon aiguille ©MD-Orléans

• Empreinte de l'éléphant CSB-Orléans

Chargez, déformez !

Appuyez sur chacune des deux mousses avec un doigt pour diminuer leur hauteur.
Faut-il exercer la même force sur chacune ?

1 / 1

Que retenir ?

Les deux mousses ont subi une **déformation** identique, malgré leurs sections différentes ! C'est qu'elles ont été soumises à des charges inégales, d'autant plus élevées que la section est importante. La **déformation** dépend du quotient entre la force exercée et la surface sur laquelle elle s'exerce. Ce quotient est appelé « **contrainte** ».

Tant que la charge reste modérée, les barres retrouvent leur longueur initiale lorsqu'on supprime la charge : la déformation est dite « **élastique** ».



Si la charge dépasse un certain seuil, une partie de la déformation subsiste après suppression de la charge. La déformation est alors dite « **plastique** ».

Tirez, étirez !

Tirez sur la boule située sous la barre horizontale pour libérer les trois poids qui pendent au bout des fils élastiques.

Comment expliquer que les déformations soient différentes ?

1 / 2

Que retenir ?

Les charges étant modérées, la déformation est **élastique**. Plus la charge est importante, plus la contrainte est grande.

Si la charge appliquée est trop importante de sorte que la contrainte dépasse un certain seuil appelé **limite d'élasticité**, la déformation devient **plastique** : une déformation subsiste, même après suppression de la contrainte.

Si l'on augmente encore la charge, la rupture survient : c'est la **contrainte à la rupture** également appelée **résistance**.



À diamètre égal, un fil de soie est plus résistant qu'un câble d'acier.

Selon que le matériau se déforme un peu ou beaucoup avant de rompre, le matériau est dit **fragile** ou **ductile**.

sur une idée de Galilée (1564-1642)

Dur ou mou ?

Faites coulisser le bac pour positionner ces trois tiges au-dessus d'une surface lisse.
Libérez-les en enfonçant les deux boules latérales.

Après quelques secondes remontez les tiges et comparez leurs empreintes.

1 / 3

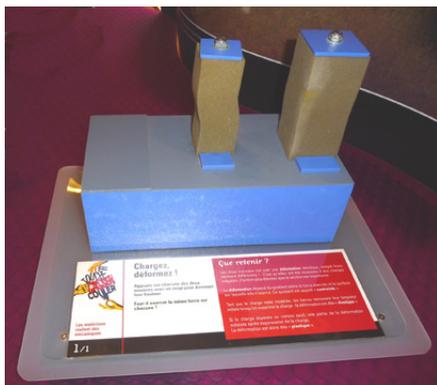
Que retenir ?

La **dureté** d'un matériau est mesurée grâce à l'empreinte qu'y laisse un poinçon, appelé "**indenteur**", sous une charge donnée.

Les deux premiers "indenteurs" présentent des surfaces de contact plates de tailles inégales. Le plus gros laisse une marque réversible, l'autre une empreinte définitive. L'un a exercé une contrainte inférieure à ce seuil de **plasticité**, l'autre une contrainte supérieure.



Le troisième présente une extrémité conique dont la surface de contact augmente à mesure qu'il s'enfonce. Ceci entraîne la diminution de la contrainte. L'indenteur se stabilise quand la contrainte a atteint le niveau de cette contrainte-limite d'élasticité.



Pour mettre la main à la pâte

1/1 Chargez, déformez !

A faire en classe ou chez soi :

Trouvez une chaussure à talon aiguille et un disque ou un carré rigide (bois ou PVC) de 40 cm de diamètre ou de côté.
Posez-les sur une surface un peu molle (carton, plastique ou balatum).
Appuyez de toutes vos forces sur le talon aiguille et, même à plusieurs, sur la surface rigide. Observez et comparez les enfoncements produits par les 2 objets.



Une femme de 50 kg qui s'appuie sur un talon aiguille d'un cm² exerce sur le sol une contrainte de 50/1 kg par cm².
Un pied d'éléphant de 40 cm de diamètre et qui a donc une aire d'à peu près 1200 cm², pour un poids de 3 tonnes exerce sur le sol une contrainte de 3000/1200 kg par cm² soit **20 fois plus petite** que celle d'un talon aiguille !

Plus simple : prenez une allumette et une aiguille.
Appuyez un doigt sur chacun des bouts de l'allumette puis, avec la même force, sur le bout de l'aiguille.
Pourquoi êtes-vous plus prudent avec l'aiguille ?



Pour mettre la main à la pâte

1/2 Tirez, étirez !

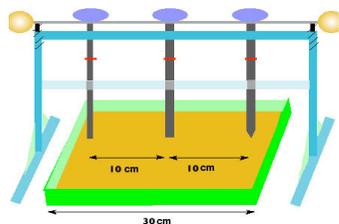
A faire en classe ou chez soi :

Trouvez des petits bracelets élastiques ou des bracelets «looms» et un objet d'une masse d'environ 100 grammes.

Accrochez l'objet sous un bracelet et essayez de le décoller en tirant sur l'élastique.
Refaites l'expérience en faisant une seule chaîne avec 2 puis 4 bracelets bout à bout.
Comparez les résultats, mesurez l'allongement total et l'allongement de chaque anneau.
Les élastiques reprennent-ils leur forme et leur dimension initiale ?



Refaites l'expérience en réalisant deux chaînes de 4 élastiques mis côte à côte, fixées à une extrémité et accrochées à l'autre extrémité au poids.



Pour mettre la main à la pâte

1/3 Dur ou mou ?

A faire en classe (inspiré de www.fondation-lamap.org/) :

- 1- Où ces mots ont-ils été rencontrés ? à l'école (ou au collège), à la maison, en dehors.
- 2- Faites élaborer une définition collective de ces deux mots.
- 3- Faites réaliser une petite expérience scientifique autour d'eux. Puis revenez sur le point 2.
- 4- Avez-vous déjà rencontré ces mots dans les livres, les bandes dessinées...

A faire chez soi :

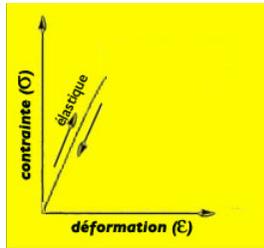
Trouvez autour de vous, en classe ou chez vous, des matériaux très mous et des matériaux très durs.
Par exemple, sortez du frigidaire, ou mieux du congélateur, de la pâte à tarte, du beurre ou du camembert.
Sont-ils durs ou mous ? Laissez-les quelques temps sur la table. Que va-t-il se passer ?

Dans la salle de bain, savon, dentifrice, gel sont-ils des matériaux mous, durs. Trouvez-en d'autres.

1

Pour en savoir plus

1/1 Chargez, déformez !



Lorsqu'on exerce une force sur une barre d'une matière plus ou moins dure, elle s'affaisse. La déformation est d'autant plus grande que la force est grande. Elle est aussi d'autant plus importante que l'aire de la section droite de la barre est petite.

En régime d'élasticité linéaire, la déformation ϵ est directement proportionnelle à la contrainte σ , définie comme le rapport de la force F à l'aire de la surface de contact ; elle se mesure en unité de pression, le pascal (Pa). Les relations qui relient ces deux grandeurs sont des données caractéristiques des matériaux.

Pour un chargement en compression (ou en traction), le quotient de la contrainte sur la déformation définit le module d'élasticité longitudinale, ou **module d'Young (E)** : $E = \sigma/\epsilon = (F/S).(L/\Delta L)$

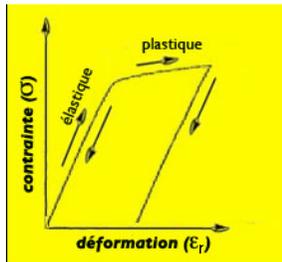
(L : longueur de la colonne ; ΔL : variation de longueur sous charge).

E est une caractéristique du matériau et s'exprime en pascal. La relation précédente est la loi de Hooke de l'élasticité linéaire.

voir "Matière et Matériaux" (M&M) page 252

Pour en savoir plus

1/2 Tirez, étirez !



En régime élastique, des fils faits d'un même matériau (un fil d'araignée, une bande élastique ou un câble d'acier) et de différents sections, soumis à différents chargements, subissent une déformation identique si le rapport du poids (exprimé en Newton) à la surface, ou **contrainte**, est constant.

Ce n'est donc pas directement la force qui importe dans ce type de problème mais le rapport de cette force à l'aire de la section droite du câble où elle s'applique.

L'allongement ΔL de chaque fil est proportionnel à la contrainte. Il dépend de la nature élastique du fil (mesurée par le module d'Young E). La rigidité est d'autant plus grande que l'allongement est faible pour une même contrainte et que E est grand.

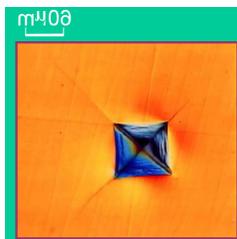
La relation $E = (F/S).(L/\Delta L)$ exprime de la loi de Hooke comme pour la tension en 1/1, mais ici pour un problème de traction. Dans ce régime **élastique**, si on supprime la charge, l'allongement s'annule : la déformation est réversible tout comme pour une tige en compression. Pour d'autres matériaux dits **plastiques**, au-delà d'une certaine charge on ne revient pas à la longueur initiale après étirement et une déformation résiduelle ϵ_r lorsque la contrainte revient à zéro (figure).



Si la rupture se produit brutalement alors qu'on est encore en régime élastique, on parle de **rupture fragile**. Si on continue à augmenter la charge dans ce régime d'écoulement plastique, il y a rupture : on parle de **rupture ductile**. (voir 5/1)

Pour en savoir plus

1/3 Dur ou mou ?



Pour une même charge, des indenteurs à fond plat ont d'autant plus de chance de laisser une empreinte permanente que leur section est petite car le risque est alors plus grand d'atteindre le **seuil de plasticité** au delà duquel la déformation ne revient pas à zéro (voir 1/2).

Une mesure du seuil de plasticité est le rapport de la charge à l'aire de la surface finale de contact. Ce seuil dépend aussi de la nature du matériau.

Pour un **indenteur** à bout pointu, la surface de contact augmente au cours de l'expérience et la contrainte diminue jusqu'à obtention d'un équilibre correspondant à un rapport constant de la charge à l'aire de la surface projetée.

Une expression simple de la dureté D est donnée par la relation dite de Meyer : $D = F/S$, où D s'exprime en pascal (Pa), F est la force sur l'indenteur et S l'aire de la surface de l'empreinte projetée sur un plan normal à l'axe de chargement.

Le schéma ci-contre illustre le cas d'une empreinte laissée par un indenteur pyramidal de type Vickers.

2

Tout matériau est déformable !
L'application de forces entraîne des variations de forme et de dimension : les éléments de matière changent de positions relatives !

Le **déplacement** est une mesure absolue de ces variations. C'est une grandeur directement accessible à l'expérimentation.

La **déformation** permet de comparer l'état déformé à l'état initial sous forme d'un rapport sans dimension. L'amplitude de cette déformation dépend des forces appliquées, de la nature de la matière et de la géométrie.

Toutes les échelles sont concernées : d'un globule rouge dans un écoulement sanguin, une plante couchée par le vent, jusqu'à une chaîne de montagne (Alpes, Himalaya...).

L'allongement d'un câble, la flexion d'une poutre ou le pliage d'une tôle sont des opérations qui déforment la matière. Au-delà d'un seuil, la déformation peut conduire à la rupture.

L'étude de la déformation d'une structure sous charge, en fonction de sa géométrie et des propriétés mécaniques du matériau constitutif est la **Résistance des Matériaux** dont l'origine remonte à la publication du Discours sur deux nouvelles sciences de **Galilée** en 1638.

Tout matériau est déformable !
L'application de forces entraîne des variations de forme et de dimension : les éléments de matière changent de positions relatives !

Le **déplacement** est une mesure absolue de ces variations. C'est une grandeur directement accessible à l'expérimentation.

La **déformation** permet de comparer l'état déformé à l'état initial sous forme d'un rapport sans dimension. L'amplitude de cette déformation dépend des forces appliquées, de la nature de la matière et de la géométrie.

Toutes les échelles sont concernées : d'un globule rouge dans un écoulement sanguin, une plante couchée par le vent, jusqu'à une chaîne de montagne (Alpes, Himalaya...).

L'allongement d'un câble, la flexion d'une poutre ou le pliage d'une tôle sont des opérations qui déforment la matière. Au-delà d'un seuil, la déformation peut conduire à la rupture.

L'étude de la déformation d'une structure sous charge, en fonction de sa géométrie et des propriétés mécaniques du matériau constitutif est la **Résistance des Matériaux** dont l'origine remonte à la publication du Discours sur deux nouvelles sciences de **Galilée** en 1638.

Déplacements et déformations

« Tout s'écoule » même les solides !
La rhéologie (en grec "rheîn" signifie "couler" !) est la science des déformations de la matière.



• Poutre déformée ©SR-Oléans
• Poutre d'axe ©J.DavilleChabauty-Fotolia.com
• Sable fluide dans le temps ©SR-Oléans

• La chapeau de gendarme – un piège antiscandale dans le Haut-Jura ©EE-Linours



Ça fléchit... plus ou moins !

2/1

Bien que leurs formes soient différentes, ces quatre poutres ont des profils de même aire.

Appuyez au milieu de chaque poutre.

Quelle est celle qui fléchit le plus facilement ?



Que retenir ?

Sous l'effet d'une force appliquée verticalement, une poutre horizontale fléchit : le centre de la poutre s'abaisse d'une distance appelée **flèche**. Par suite de la déformation, la face supérieure est comprimée et la face inférieure étirée. Le plan à égale distance des deux faces ne subit aucune contrainte, on parle de **plan (ou d'axe) neutre**.

Pour augmenter la résistance d'une poutre à la flexion, il faut donc concentrer la matière aux endroits où les contraintes sont importantes, c'est-à-dire loin de l'axe neutre, au-dessus et au-dessous.

Ainsi la poutre haute (2) résiste mieux que la poutre large (1).

Les poutres évidées, ayant un profil en **I** ou en **□**, résistent presque aussi bien que des poutres pleines ayant le même profil global. Utilisant moins de matière, elles allègent les structures.

Tordu comme un ressort

2/2

Tirez légèrement sur la masse à l'aide de la cordelette pour allonger le ressort. Lâchez.

Que se passe-t-il ?

Pourquoi le système oscille-t-il de bas en haut et en tournant sur lui-même ?



Que retenir ?

Quand on tire sur un ressort, il s'allonge. Une fois lâché, il se contracte puis se rallonge, se re-contracte... et ainsi de suite : il **oscille**.

Si on observe de près les spires du ressort, on constate que le fil lui-même ne s'allonge pas. C'est parce que le fil se tord que les spires fléchissent et que le ressort s'allonge. Cette torsion fait tourner ce pendule de Wilberforce. Plus précisément on peut observer une séquence de phases où le pendule oscille et celles où le pendule tourne.

La déformation due à la torsion est le résultat de contraintes de **cisaillement**. C'est-à-dire des contraintes qui résultent de l'application de forces parallèlement à une surface, comme lorsqu'on fait glisser des cartes à jouer les unes contre les autres en les distribuant ou en les écartant en éventail.

sur une idée de Basile Audoly (Institut d'Alembert - Université Paris 6)

Taille fine ?

2/3

Tirez sur la boule située sous la barre horizontale pour libérer les poids.

Observez le diamètre du fil caoutchouc et la largeur de la bande ?



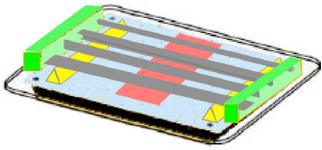
Que retenir ?

Lorsqu'on tire sur un objet, il s'allonge dans la direction de la force appliquée. Simultanément, sa section rétrécit. Inversement, si on comprime un objet, sa longueur diminue tandis que sa section s'élargit.

Le rapport de la réduction relative de la section à l'allongement relatif est appelé **coefficient de Poisson** P_σ . Il est compris entre $\frac{1}{2}$ pour des corps incompressibles (caoutchouc) et 0.

Il ne faut pas confondre cet effet avec celui du fluage dans lequel un fil de matériau qu'on étire diminue de largeur de façon irréversible au cours de l'allongement. Ceci conduit irrémédiablement à la rupture du fil !

sur une idée de Jean-Christophe Sangleboeuf (Larmour – Université Rennes 1)



Pour mettre la main à la pâte

2/1 Ça fléchit... plus ou moins

A faire en classe ou chez soi :

Dans votre classe ou chez vous, y a-t-il des planches, des poutres qui fléchissent ?
Trouvez une planche la plus longue possible et placez ses extrémités sur 2 dictionnaires ou 2 piles de livres de même hauteur. Appuyez ou asseyez-vous au milieu de la planche.
Résiste-t-elle un peu, beaucoup ? Pourquoi ?
Refaites l'expérience en coinçant seulement l'une des extrémités.
Pour cette expérience, vous pouvez aussi utiliser des tiges végétales : bambou, maïs, blé, fleur...

Observez un chantier de construction ou un pont métallique.
Essayez de trouver des poutres en fer en forme de **I**.
On appelle ces poutres des poutres IPN ("poutres en I à profil normal").



Pour mettre la main à la pâte

2/2 Tordu comme un ressort !

A faire en classe ou chez soi :

Enroulez un tuyau d'arrosage (ou une corde assez épaisse) sur lui-même.
Comment se comporte-t-il ?

Observez les plantes qui vrillent sur elles-mêmes. Certaines s'enroulent sur elles-mêmes.
D'autres forment des hélices qui vrillent comme un ressort.
Comparez leurs formes à celles d'une vis, d'une vrille ou d'un tire bouchon.

Fabriquez votre propre ressort Slinky en origami sur l'idée de Jo Nakashima en suivant => www.youtube.com/watch?v=2ErCU013v0k
En collant 4 pièces bout à bout, observez comment se comporte la spirale quand on tire verticalement sur les 2 extrémités.



Pour mettre la main à la pâte

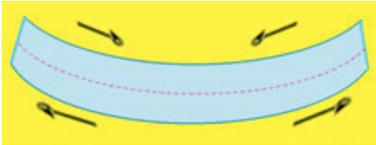
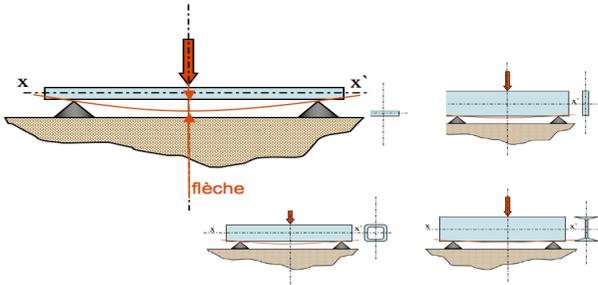
2/3 Taille fine ?

A faire en classe ou chez soi :

Dans un ballon de baudruche, une vieille chaussette ou un bas qui a filé, découpez des bandes de 15 à 20 cm de long et de 4 à 5 cm de large.
Étirez ces bandes et observez comment elles se comportent au milieu.

Étirez puis comprimez un petit cylindre en mousse ou un bouchon en liège ou en caoutchouc.
Comparez les comportements.

2



Pour en savoir plus

2/1 Ça fléchit... plus ou moins

De nombreuses structures sont sollicitées en flexion. C'est le cas du tronc d'un jeune arbre sous la neige, du fuselage et des ailes d'avion, des lames vibrantes des xylophones ou encore des poutres supportant les planchers.

Le cas de la flexion est particulièrement intéressant. En effet, la flèche d'une structure sollicitée en flexion, qui représente son déplacement maximal, traduit en réalité un état de contrainte associant compression et traction, si bien que le cœur d'une poutre travaillant en flexion est en fait libre de contrainte (on l'appelle «**axe neutre**»).

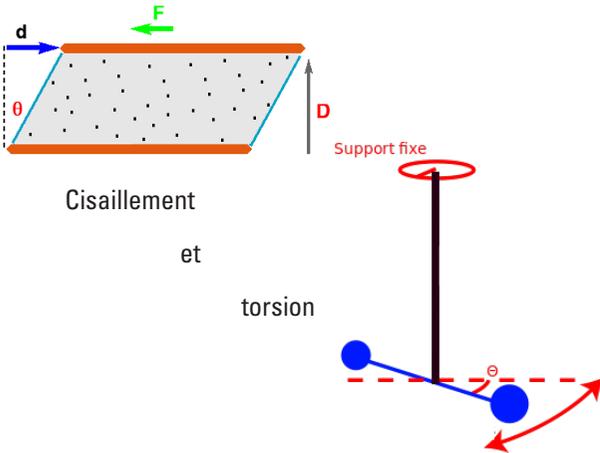
Ainsi, des poutres d'aires de la section droite identiques, mais de profils différents présenteront des flèches différentes (la déformée est schématiquement représentée par le tracé en rouge ci-contre), ou pour une flèche maximale imposée, une structure creuse ou profilée en I apportera la même rigidité tout en étant beaucoup plus légère.



Evidemment, si les comportements diffèrent en compression et en traction (cas des matériaux à fibres, des élastomères etc.), l'axe neutre s'écarte du centre.

Le **module d'élasticité de Young** (E), valable pour la compression et la traction, contrôle la flexion.

voir M&M page 253



Pour en savoir plus

2/2 Tordu comme un ressort !

Le module d'Young (E) caractérise l'élasticité longitudinale des matériaux.

Un module élevé veut dire une grande résistance à la déformation.

Un second module d'élasticité ou **module de cisaillement** G traduit la résistance à la **torsion**.

Si vous appuyez sur l'extrémité libre de l'une des spires d'un ressort, vous constatez que la rotation de la spire s'accompagne d'une torsion de la tige. Pour le ressort, le fléchissement se fait sur le diamètre du ressort.



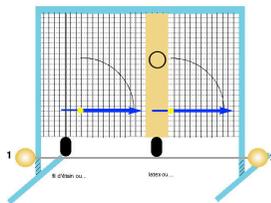
Un ressort s'allonge d'autant plus que le diamètre d du fil est petit, que le diamètre D de la spire est grand et que le nombre n de spires est grand.

C'est aussi le module G qui gouverne la réponse élastique en cisaillement d'un joint de colle ou d'un arbre transmission d'un moteur.

La déformation de cisaillement est caractérisée par le rapport d/D . Le **module de cisaillement** G est le rapport entre la force de cisaillement rapporté à la valeur de la surface horizontale S à la déformation, soit $F/S = G \cdot d/D$. (voir aussi le Pour en savoir plus 6/1)

Pour en savoir plus

2/3 Taille fine ?



Pour un matériau incompressible, le **coefficient de Poisson**, P_0 , est égal à $1/2$, ce qui traduit le fait que la compression compense exactement les effets d'allongement.

Si le matériau ne change pas ses directions transverses à l'effort longitudinal, le coefficient P_0 est nul. Ce serait le cas d'un bouchon qui ne change pas de dimension transverse quand on l'enfonçe ou le tire.



Il existe une relation entre le module de Young E , le module de cisaillement G et P_0 : $E = 2 \cdot (1 + P_0) \cdot G$

3

La loi de Hooke de l'élasticité fait jouer à l'extension ou à la compression d'une barre des rôles symétriques : pour une même valeur absolue de la force, l'allongement ou le raccourcissement ont la même valeur.

Une tige ou une plaque comprimées se déforment et prennent des formes différentes :

- un épi trop chargé fait fléchir la tige de blé : on parle de **flambement**. Pour cette raison, en construction, on raidit les structures élancées (colonnes, poutres, gratte-ciel...) par des entretoises.

- une tige que l'on plie ou tord fortement fera des plis dans la zone comprimée : on parle de **cloquage**.

- une canette de boisson, que l'on tasse après usage, s'écrase brutalement. On parle de **ruine**.

Artistes (César, Vernassa) et ferrailleurs automobiles utilisent ces déformations pour compacter objets ou voitures.

Si on contrôle ce processus pour le rendre continu et progressif, on peut absorber de manière maîtrisée l'énergie d'une collision. Ce principe est utilisé dans la structure avant d'une automobile pour préserver les occupants !

La loi de Hooke de l'élasticité fait jouer à l'extension ou à la compression d'une barre des rôles symétriques : pour une même valeur absolue de la force, l'allongement ou le raccourcissement ont la même valeur.

Une tige ou une plaque comprimées se déforment et prennent des formes différentes :

- un épi trop chargé fait fléchir la tige de blé : on parle de **flambement**. Pour cette raison, en construction, on raidit les structures élancées (colonnes, poutres, gratte-ciel...) par des entretoises.

- une tige que l'on plie ou tord fortement fera des plis dans la zone comprimée : on parle de **cloquage**.

- une canette de boisson, que l'on tasse après usage, s'écrase brutalement. On parle de **ruine**.

Artistes (César, Vernassa) et ferrailleurs automobiles utilisent ces déformations pour compacter objets ou voitures.

Si on contrôle ce processus pour le rendre continu et progressif, on peut absorber de manière maîtrisée l'énergie d'une collision. Ce principe est utilisé dans la structure avant d'une automobile pour préserver les occupants !



Affaiblir en pressant

Qui n'a pas joué à comprimer une règle d'écolier ? La compression peut être une source d'instabilités, alors que la tension augmente très souvent la stabilité

• Pyrene brisé lors d'une tempête en Basco ©PB-Neuville-aux-Bais
• Cauchis par le poids des épis ©SP-Elvans
• Bidon aplati, œuvre d'Edouard Vernassa, artiste plasticien ©M.Montecelli-Nico

• Je plus mais je protège © Intalia.com



Ça flambe, plus ou moins !

3/1

Appuyez doucement sur chacune des trois boules.
Observez comment chaque lame s'écarte ou non
de sa position initiale.

Que pouvez-vous en conclure ?

Que retenir ?

Si on exerce sur les extrémités d'une lame une force de compression suffisante, elle fléchit au lieu de se comprimer : elle **flambe**.

Une structure flambe d'autant plus facilement que les éléments qui la composent sont élancés, c'est-à-dire plus longs que larges. Ainsi la lame n°2, plus large, flambe plus difficilement que la lame n°1.



On peut aussi disposer entre les éléments des entretoises qui subdivisent les pièces verticales en tronçons plus courts. Empêchés de s'écarter, ils flambent plus difficilement encore (lame n°3). C'est le rôle des barres horizontales des pieds d'une chaise ou d'un tabouret.

Ça flambe et ça cloque

3/2

> Appuyez sur la boule pour courber la barre de silicone (1).

> Tordez le cylindre de mousse (2).

Que font les bandes collées dessus ?

Merci de replacer les bandes sur les mousses après l'expérience

Que retenir ?

Lorsqu'on associe étroitement deux matériaux mur et peinture par exemple, le plus mince peut flamber plus facilement que l'autre : ça **cloque**. C'est ce qui arrive aux bandes collées à la surface de ces objets en mousse. Elles cloquent dans les zones où le support est comprimé.

La compression exercée sur la barre la fait flamber en flexion. Une de ses faces est étirée, l'autre comprimée. De même, la torsion exercée sur le cylindre fait cloquer la bande collée à sa surface. N'étant pas dans la même matière et ne subissant pas la même contrainte, la bande collée à la surface de l'objet réagit différemment. Dans les zones où le support est comprimé, elle cloque.



Le cloquage est néfaste dans de nombreuses applications : collage des sols souples, photo collée sur un support rigide... Les axes de compression sont l'axe du cylindre dans la compression et un axe à 45 degrés dans la torsion du cylindre.

sur une idée de José Bico (ESPCI-ParisTech)

Le mètre qui claque

3/3

Avec le pouce et l'index de vos deux mains
déroulez la lame du mètre hors de son boîtier.

Continuez ainsi jusqu'à ce que la lame plie.
Répétez l'expérience.

Le résultat est-il toujours le même, sauriez-vous l'expliquer ?

Que retenir ?

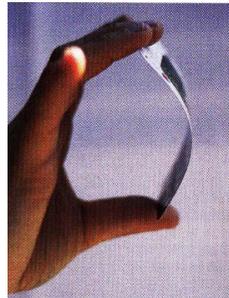
Plus la lame s'allonge, plus le poids qui pourrait la faire fléchir augmente.
Plus le poids s'éloigne de la sortie, plus il aura tendance à fléchir la lame.

Ces deux éléments se conjuguent pour faire fléchir brutalement la lame quand elle atteint une longueur déterminée.
Ce brusque fléchissement s'appelle la **ruine**.



La masse de la partie du mètre ruban sortie de l'enrouleur induit un couple de flexion qui est maximal au voisinage de l'enrouleur (zone assimilable à un encastrement).

sur une idée de Matteo Ciccotti (ESPCI ParisTech)



Pour mettre la main à la pâte

3/1 Ça flambe, plus ou moins !



A faire en classe ou chez soi :

Prenez un ticket de bus, de tramway ou de métro, voire une carte à jouer.
Pincez le dans le sens de la longueur entre deux doigts et pressez doucement jusqu'à ce qu'il se courbe.
Dans quel sens se courbe-t-il ? Pourquoi ?

Et si vous le pincez dans le sens de la largeur ?

Si on courbe le ticket de telle façon qu'il fasse un C dans le sens de la largeur, avant d'appliquer une contrainte, on constate que le ticket résiste plus au flambage. La déformation brutale correspond à la ruine examinée en 3/3.

Pour mettre la main à la pâte

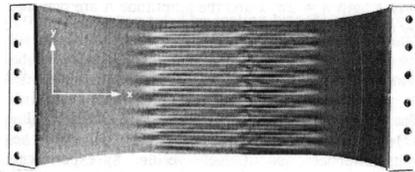
3/2 Ça flambe et ça cloque



A faire en classe ou chez soi :

Tirez sur une bande de film plastique ou de caoutchouc et observez la formation de bandes régulières.
La bande s'allonge mais, dans le même temps, se rétrécit dans le sens transverse en créant une instabilité de **flambage** faite de plis équidistants dans la direction où l'on tire.

Prenez une feuille de papier et trempez l'un des bords le plus long dans l'eau sur 4 à 5 cm.
Ressortez la feuille et observez ce que fait la partie mouillée. Pourquoi gondole-t-elle ?



Pour mettre la main à la pâte

3/3 Le mètre qui claque



A faire en classe ou chez soi :

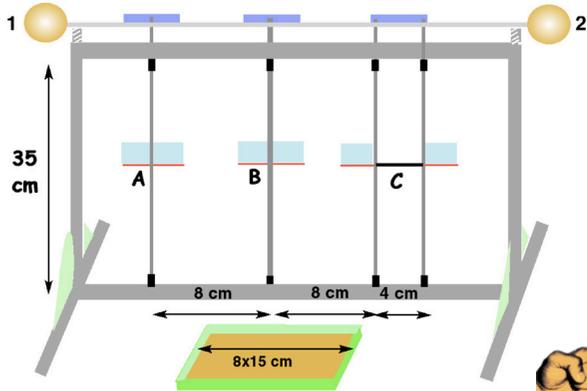
Prenez une bande de papier ou de rhodoïd de 20 cm de longueur et placez-la à l'intérieur d'un livre.
Faites-la sortir progressivement en la tirant par la partie la plus au bord du livre.
De même, verticalement, une tige végétale (un épi trop chargé, une fleur couverte d'eau de pluie ou de neige) se courbe jusqu'à plier et casser.

Posez deux boîtes de boisson vides au sol et posez les pieds dessus (en maintenant votre corps en appui). Les boîtes résistent. Il suffit qu'une autre personne applique symétriquement une pichenette simultanément sur les cotés des deux boîtes pour qu'elles s'écrasent d'un seul coup !

La forme incurvée en C augmente la rigidité mais aussi la déformation soudaine (ruine; voir 3/1).



3



Pour en savoir plus

3/1 Ça flambe, plus ou moins !

Un faible chargement d'une tige en compression engendre un raccourcissement de chaque lame pour des faibles charges. Au-delà d'une charge seuil, et si la structure comprimée est suffisamment élancée (quotient de la longueur sur le diamètre ou l'épaisseur), une instabilité apparaît. Celle-ci se manifeste par le développement relativement rapide d'un déplacement perpendiculaire à l'axe long de la structure : c'est le phénomène de flambage.

Sous l'effet de la contrainte de compression, les lames ne se limitent donc pas à un raccourcissement mais se déforment transversalement.

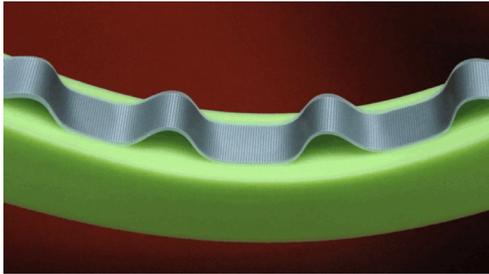
Le seuil de charge de flambage augmente quand la longueur de la poutre diminue (comme l'inverse du carré de la longueur L), d'où les nouvelles variétés de blé qui sont aujourd'hui plus courtes pour moins flamber.

On stabilise des structures mécaniques faites de tiges parallèles en disposant de façon transversales des barres qui permettent de diminuer la longueur libre de ces tiges.

Euler a été le premier à proposer une expression de la charge critique de flambage : $F_c = \pi^2 E I / L^2$

où E est le module d'Young, I est le moment quadratique d'inertie (par exemple pour une colonne pleine circulaire de rayon R , $I = \pi R^4 / 4$) et L la longueur de la colonne.

voir M&M page 144



Pour en savoir plus

3/2 Ça flambe et ça cloque

En faisant subir une contrainte de compression à ces mousses, on les fait flamber : elles se déforment et fléchissent dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression.

La mousse est étirée le long de sa face convexe, comprimée sur sa face concave, et ce d'autant plus que le support est épais. La bande adhésive collée au support interne fait des cloques régulières pour conserver sa longueur.

Le cloquage est néfaste dans de nombreuses applications telle que le décollement des sols souples.

A petite échelle, une photo collée sur un support plastique ou du verre se dilate plus que son support au cours du séchage ou sous l'action de l'humidité ou de la variation de température. La photo va "gondoler".

Le cloquage peut être utilisé pour mettre au point des circuits électroniques mécaniquement flexibles (appareils médicaux fixés sur des articulations, papier électronique).

En effet un circuit électronique cloqué peut facilement fléchir sans engendrer des déformations trop importantes du matériau si le seuil de plasticité est atteint.

voir M&M page 253



Pour en savoir plus

3/3 Le mètre qui claque

Dans **la ruine**, la déformation est importante et irréversible si le seuil de plasticité est atteint comme sur plusieurs tiges de ce cactus. Elle met en jeu de grandes déformations qui, de plus, sont soudaines et localisées (là où le mètre ruban ou la feuille de cactus, trop chargés, se plient brutalement). Il en est de même d'une boîte de boisson que l'on comprime et qui va s'écraser soudainement lorsque la contrainte dépasse un certain seuil.

On est dans une situation non linéaire où la déformation varie plus vite que la contrainte. La déformation est irréversible si elle se produit au delà du seuil de plasticité.

Même si on supprime la cause de la déformation, le matériau ne reprend pas sa forme initiale (ce n'est heureusement pas le cas avec le mètre ruban !)

Dans l'industrie automobile (voir m/9 - PSA Peugeot-Citroën), on cherche à utiliser ces déformations irréversibles pour absorber progressivement l'impulsion lors d'une collision sans que la cabine des passagers ne se déforme.

4

Une structure peut être renforcée par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent, comme pour le béton précontraint.

Dame Nature utilise cette combinaison des forces dans de nombreuses structures du vivant pour leur conférer stabilité et souplesse :

- les muscles des vertébrés sont tendus et leur squelette comprimé, ce qui assure équilibre et mobilité du corps,

- les fibres qui bordent une tige de rhubarbe (le pétiole) sont en tension et introduisent des contraintes qui la rigidifient. Enlevez ces fibres : elle devient toute molle !

- la structure fibreuse des arbres leur confère une meilleure résistance en traction qu'en compression. Pour lutter contre les vents dominants, le tronc se renforce du côté sollicité en traction ; on parle de bois de tension !

- les squelettes des cellules animales, ou cytosquelettes, sont construits avec un réseau de microfilaments en tension qui compriment et donnent sa forme à la cellule.

Une structure peut être renforcée par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent, comme pour le béton précontraint.

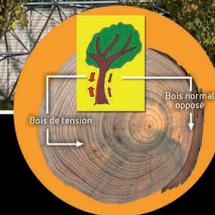
Dame Nature utilise cette combinaison des forces dans de nombreuses structures du vivant pour leur conférer stabilité et souplesse :

- les muscles des vertébrés sont tendus et leur squelette comprimé, ce qui assure équilibre et mobilité du corps,

- les fibres qui bordent une tige de rhubarbe (le pétiole) sont en tension et introduisent des contraintes qui la rigidifient. Enlevez ces fibres : elle devient toute molle !

- la structure fibreuse des arbres leur confère une meilleure résistance en traction qu'en compression. Pour lutter contre les vents dominants, le tronc se renforce du côté sollicité en traction ; on parle de bois de tension !

- les squelettes des cellules animales, ou cytosquelettes, sont construits avec un réseau de microfilaments en tension qui compriment et donnent sa forme à la cellule.



Renforcer en tirant

Le terme "tenségrité" a été inventé par l'architecte américain Buckminster Fuller pour décrire sa construction du dôme géodésique de Montréal.

• Photographie d'un pied de danseuse ©Fotostock.com
• Joints de roue et cadre sous tension ©Christophe Proulx-Designer roumain
• Gare TV de Woburn - Chine ©J.K.K.Lee
• Sous le vent, le tronc d'arbre se renforce ©G. Poir-Duiz, Clément-Ferrand

• La Biosphère de Montréal ©Auro-Foncia.com



Guitares et raquettes

4/1

Appuyez sur chaque corde de guitare pour que son milieu touche le plateau. Faut-il exercer la même force sur chacune ?

Pincez les cordes et comparez la hauteur des sons qu'elles produisent. Comment expliquer leurs différences ?

Que retenir ?

La seule chose qui différencie ces cordes, c'est leur tension. Pour une même force appliquée en son centre, la corde se déforme d'autant moins qu'elle est plus tendue.

On peut différencier les différentes tensions des cordes à l'oreille. La force nécessaire pour fléchir la corde est plus importante si elle est plus tendue. C'est aussi la force avec laquelle la corde va revenir à sa forme initiale. Plus cette force est grande, plus la vibration de cette corde est rapide et plus le son est aigu.

Comme la corde, une poutre soumise à une traction préalable résiste donc mieux à la déformation. Cela augmente la stabilité de la structure dans laquelle elle est intégrée.

Troncs d'arbres et autres tiges

4/2

Les 3 lames de mousse sont identiques. Sur les lames 2 et 3, une bande a été collée soit sur une face soit sur les deux.

Appuyez sur la barre horizontale à l'aide des boules latérales pour libérer les lames.

Observez ce qu'il se passe.

Que retenir ?

Sous l'effet de leur propre poids, ces trois lames sont susceptibles de fléchir quand elles dépassent largement au-dessus de l'entretoise. Dépourvue de bande adhésive, la lame n°1 fléchit aussi bien d'un côté que de l'autre. La lame n°2, dont une face est dotée d'un scotch sous tension, va s'incliner du côté où se trouve ce scotch. En fléchissant de ce côté, elle détend la face sur laquelle est collé le scotch au lieu de tendre celui-ci davantage.

Les deux faces de la lame n°3 portant des bandes adhésives tendues, celle-ci n'a aucune raison de flamber parce que cela augmenterait la tension des scotchs. Elle se comprime verticalement.

Dans le monde végétal, la partie la plus extérieure d'un tronc ou d'une tige est souvent sous tension, ce qui l'empêche de flamber sous le poids des branches, feuilles et autres fleurs (voir légende de la coupe d'arbre du panneau).

sur une idée de Thomas Cambau (ESPCI-ParisTech)

La tenségrité dans l'architecture

4/3

Appuyez sur la structure et relâchez-là.

Pourquoi reprend-elle sa forme initiale ?

Que retenir ?

Le *Skwish* est un jouet constitué d'élastiques reliant des tiges de bois. On peut l'écraser complètement, il reprend toujours sa forme initiale.

Il met en œuvre une structure appelée anneau de tenségrité qui relie des éléments rigides (barres) sollicités en compression à des éléments flexibles (câbles) sollicités en tension.

La roue de bicyclette illustre à merveille ce principe : la jante subit une compression, les rayons une traction.

Les petites tables que vous trouverez autour de l'exposition sont construites selon le même principe.



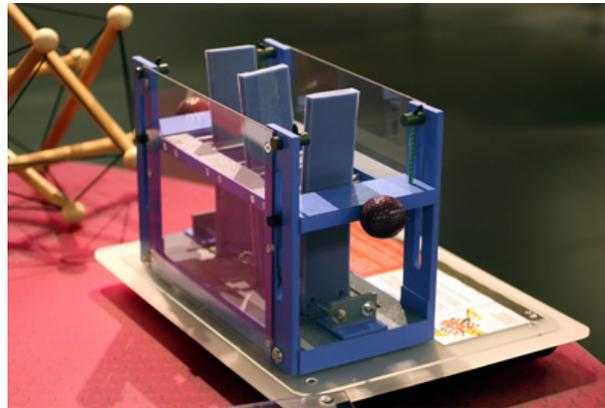
Pour mettre la main à la pâte

4/1 Guitares et raquettes



A faire en classe ou chez soi :

Dans une roue de bicyclette, les rayons sont mis en tension et compriment la jante métallique. Si un rayon se casse, la jante vrille (à ne pas faire volontairement !).



Pour mettre la main à la pâte

4/2 Troncs d'arbre et autres tiges



A faire en classe ou chez soi :

L'exemple de la rhubarbe est particulièrement spectaculaire. Sa pétiole (la tige) tient sa rigidité aux fibres tendues qui la bordent (et que l'on enlève pour faire de la confiture).

Faites enlever ces fibres : la tige va perdre toute sa rigidité. Vous pouvez constater qu'elle s'allonge légèrement par suite de la disparition de la tension.

Pour sentir la tension due à la partie externe de la plante, fendez l'extrémité d'un radis : il éclate. C'est pareil pour une buche qu'on fend et qui éclate.



Pour mettre la main à la pâte

4/3 La tenségrité dans l'architecture



A faire en classe ou chez soi :

Ce jeu pour nourrissons (indiqué de 0 à 6 mois) utilise un ensemble d'élastiques tendus aux extrémités de tiges de même longueur. Il illustre la rigidité en volume sans toutefois interdire des déformations ; ce qui fait qu'il ne présente pas de risque à être manipulé.

Essayez, avec des fils élastiques et des baguettes de bois, de construire votre propre jeu.

4

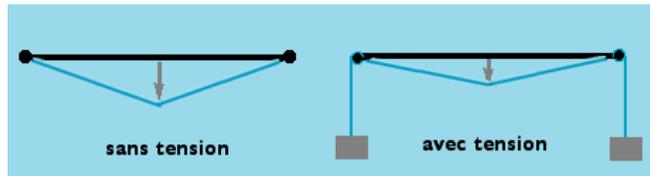
Pour en savoir plus

4/1 Guitares et raquettes

Lorsqu'on presse au centre de ces cordes, la flèche est plus importante pour la corde peu tendue pour laquelle c'est le module élastique de flexion qui limite la déformation. Dans les autres cas, c'est la composante de la tension dans la direction du doigt qui résiste à la déformation.

Dans une raquette de tennis la tension des cordes est équilibrée par la compression du cadre.

On parle de contraintes internes. Les cordes sous tension d'une raquette de tennis sont responsables de l'efficacité du rebond de la balle gonflée. Le tennisman joue en *tenségrité* (sans le savoir sauf si une corde casse ou que la balle se dégonfle). C'est tout le contraire dans un jeu de plage (ou de jokari) avec une raquette en bois et une balle élastique où les contraintes internes sont absentes.



Les cordes tendues d'une raquette de tennis résistent à l'enfoncement avec une force qui augmente avec l'enfoncement et à la tension de la corde.

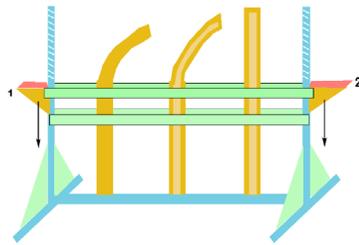
La force de résistance d'une corde simplement fixée à ses extrémités est due à la flexion mécanique et est généralement beaucoup plus faible que lorsqu'elle est en tension.

Pour en savoir plus

4/2 Troncs d'arbre et autres tiges

Cet équilibre donne la rigidité à la structure. Cette solidité est obtenue par un effet de tension. Il résulte des forces internes présentes dans la plante et qui s'équilibrent avec des effets de compression dans le reste de la tige.

A l'inverse, lorsqu'une pièce est réalisée dans un matériau offrant une résistance nettement moindre en traction qu'en compression (cas des matériaux fragiles: béton, verre, céramique) il est judicieux de faire naître des contraintes internes de compression (on parle de *précontraintes*) soit en surface (verres trempés chimiquement ou thermiquement) soit dans la masse (par transformation de phase locale ou par insertion d'éléments précontraints : cas du béton armé précontraint).



De nombreuses tiges végétales doivent leur rigidité à l'existence de zones tendues et comprimées et de zones en tension. Dans un arbre les couches périphériques sont en tension et compriment le cœur de l'arbre. La coupe d'un arbre soumis à des sollicitations transverses (vents dominants) montre une croissance dissymétrique.

De nombreuses racines comme les carottes ou les radis sont sous contraintes. Si on les fend légèrement à leur extrémité, elles libèrent ces contraintes et se fendent.

[voir table M4 et M&M page 139](#)

Pour en savoir plus

4/3 La tenségrité dans l'architecture

Le mot **tenségrité** pour *tensile integrity* (ou solidité obtenue par un effet de tension) rend compte de l'équilibre mécanique de structures architecturales telles qu'un ensemble de plaques ou de tiges qui sont comprimées et maintenues en équilibre par des câbles.

La tenségrité permet de donner de la rigidité à une structure tout en lui laissant la possibilité de subir des légères déformations sans occasionner la rupture des liaisons comme dans une architecture mécanique classique.

Une danseuse faisant des pointes utilise l'équilibre en contrainte entre les forces musculaires en tension et la légère compression des os induite par cette tension. La biomécanique doit prendre en compte l'effet de l'architecture du squelette et les contraintes musculaires des êtres vivants.

Dans le béton précontraint, des câbles métalliques sont tendus avant que le ciment ne soit versé et assurent une meilleure résistance en tension du béton après séchage.

[voir M&M pages 142 et 253](#)



5

Par temps très froid, un tuyau de caoutchouc élastique devient cassant. Gare aux fuites après l'hiver ! A basse température, un tel matériau résiste mal aux chocs mécaniques et se fracture sans déformation permanente apparente, comme une tasse de porcelaine cassée. On parle de **comportement fragile**. A haute température, par contre, et s'ils ne se décomposent pas, de nombreux matériaux ramollissent. On parle de **comportement ductile**.

Pour un verre à vitre, cette transition se produit autour de 550 °C. En dessous de cette température, le verre est cassant. Au-dessus, il est ductile et permet le travail délicat du souffleur de verre.

Pour l'acier, la transition se fait entre -40 et +40 °C suivant la teneur en divers éléments. Pour limiter les risques de rupture fragile, comme ce fut le cas pour le Titanic, il faut veiller à ce que la température de transition soit suffisamment basse.

Pour le bitume des routes, la transition se fait autour de -10 °C : dans les régions froides, des fissures apparaissent en hiver et au dégel, tandis que des ornières se forment en été.

Par temps très froid, un tuyau de caoutchouc élastique devient cassant. Gare aux fuites après l'hiver !

A basse température, un tel matériau résiste mal aux chocs mécaniques et se fracture sans déformation permanente apparente, comme une tasse de porcelaine cassée. On parle de **comportement fragile**.

A haute température, par contre, et s'ils ne se décomposent pas, de nombreux matériaux ramollissent. On parle de **comportement ductile**.

Pour un verre à vitre, cette transition se produit autour de 550 °C. En dessous de cette température, le verre est cassant. Au-dessus, il est ductile et permet le travail délicat du souffleur de verre.

Pour l'acier, la transition se fait entre -40 et +40 °C suivant la teneur en divers éléments. Pour limiter les risques de rupture fragile, comme ce fut le cas pour le Titanic, il faut veiller à ce que la température de transition soit suffisamment basse.

Pour le bitume des routes, la transition se fait autour de -10 °C : dans les régions froides, des fissures apparaissent en hiver et au dégel, tandis que des ornières se forment en été.

La ductilité rend compte de la propriété d'écoulement d'une lave chaude fondue ; une fois refroidie, elle deviendra solide et fragile.

Dur ou mou ? Une question de température !



- Bol en porcelaine cassé - XIX^e ©MD-Orléans
- Souffleur de verre en action ©Musée du verre (Gerdèves-Losny)
- Une route au Canada, colonisée après l'hiver ©FR-Rennes

• Cuisine de livre ©SR-Orléans

Plus ça chauffe, plus c'est mou !

5/1

Faites un petit boudin de pâte à modeler. Étirez-le jusqu'à ce qu'il rompe.
Puis faites une boule et chauffez-la dans vos mains quelques secondes.

Faites-en un nouveau petit boudin. Étirez-le jusqu'à ce qu'il rompe.
Comparez et reposez-le.

Que retenir ?

Si on élève leur température, certains matériaux se trouvent à mi-chemin entre solide et liquide, comme cette pâte. A 800 degrés, le verre peut être façonné par le verrier.

Si on la refroidit, la pâte à modeler se comporte comme un solide fragile : elle rompt rapidement. Puis chauffée entre nos mains, elle se comporte plutôt comme un liquide : elle se déforme sans rompre.



Le thermoformage est un procédé industriel qui utilise cette propriété pour transformer des plaques de matière plastique préalablement chauffées en gobelets, pots de yaourts, pare-chocs de voitures et emballages divers.

Aciers refroidis et cassés

5/2

Après avoir été refroidies à des températures allant de -60°C à -250°C , ces barres d'acier ont été cassées.

Comparez l'aspect des cassures.

Que retenir ?

Aux températures les plus hautes, la matière s'étire irréversiblement avant de rompre. On dit alors que le matériau et la rupture sont **ductiles**.

Aux températures plus basses, le matériau devenu **fragile** rompt net, montrant une cassure plutôt lisse. La description des cassures permet aux scientifiques d'analyser des déformations plastiques et d'en déduire la façon dont l'énergie a été dissipée entre déformations et rupture.

L'étude scientifique des cassures s'appelle la fractographie.
1 : -60°C ; 2 : -90°C ; 3 : -125°C ; 4 : -150°C ; 5 : -250°C



A partir de la topographie des faciès, les ingénieurs savent estimer ces déformations plastiques, et, de fait, l'énergie mécanique dissipée au moment de la rupture. On parle de fractographie quantitative.

sur une idée de Claudia Guerra (CEA - Saclay)

Plus c'est chaud, mieux ça coule

5/3

Les deux tubes contiennent un même sirop de glucose porté à des températures différentes.
Appuyer sur le bouton pour faire chauffer le tube de gauche.

Retournez les tubes et comparez les vitesses d'écoulement.

Que retenir ?

Tous les liquides ne s'écoulent pas aussi facilement. Certains, comme l'eau, sont très fluides et coulent facilement à température ambiante.

D'autres, comme le miel ou, ici, le sirop de canne à sucre, sont épais : on dit, dans le langage courant, qu'ils sont visqueux. Ils coulent lentement à température ambiante et plus rapidement si on les chauffe.

La viscosité des liquides décroît lorsque la température augmente. On constate ainsi que l'huile de cuisine s'écoule d'autant plus facilement qu'elle est chaude.



Attention : tous les fluides sont (plus ou moins) visqueux : l'air aussi a une viscosité !

idée et réalisation : Serge Mora - Laboratoire Charles Coulomb (CNRS et Université de Montpellier)

Pour mettre la main à la pâte

5/1 Plus ça chauffe, plus c'est mou !



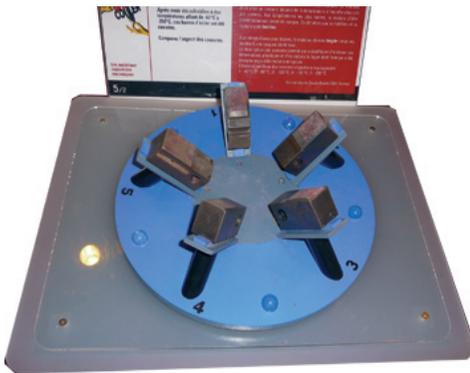
A faire en classe ou chez soi :

Placez un boudin de pâte à modeler au congélateur. Attendez une heure. Sortez-le et pliez-le jusqu'à le casser. Refaites un boudin après l'avoir roulé suffisamment entre vos mains pour le réchauffer.

Un pain un peu vieux et ramolli que l'on met dans le congélateur devient cassant comme une vitre quand on le sort. A froid, le pain est dans un état «vitreux».

Pour mettre la main à la pâte

5/2 Aciers refroidis et cassés

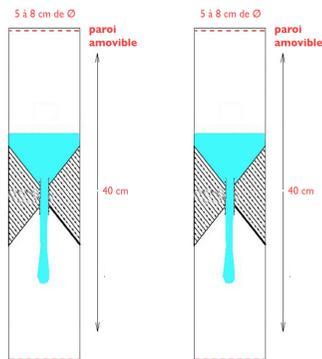


A faire en classe ou chez soi :

Tirez avec une force croissante sur un fil de cuivre de très petit diamètre. Vous constatez que, sauf pour de petits efforts et déformations induites, il reste une déformation résiduelle une fois que l'on a supprimé l'effort. C'est une manifestation de sa **ductilité**. Ce n'est pas le cas pour un fil d'acier qui reprend sa longueur initiale une fois que la force ne s'exerce plus.

Pour mettre la main à la pâte

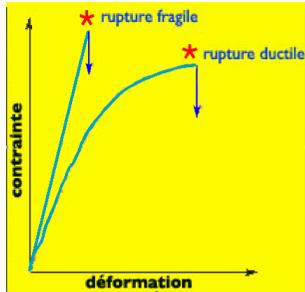
5/3 Plus c'est chaud, mieux ça coule



A faire en classe ou chez soi :

Essayez d'étaler du miel (du beurre ou de la pâte à tartiner) qui sort d'un réfrigérateur, puis du miel (du beurre ou de la pâte à tartiner), placé un certain temps à proximité d'un radiateur qui chauffe.

Ecrasez un chewing gum bien maché sur un bout de tissu inutilisé puis essayez de l'enlever ! Placez-le tout au congélateur et, après quelque temps, essayez à nouveau de les séparer.



Pour en savoir plus

5/1 Plus ça chauffe, plus c'est mou !

Lorsqu'on étire un matériau,

- Soit il reste dans un régime élastique puis casse quand on atteint une certaine déformation (on parle de **rupture fragile**),
- Soit il s'allonge de façon irréversible puis casse pour une déformation limite (**rupture ductile**).

Le passage d'un régime fragile à un régime ductile se produit lorsqu'on augmente la température.

Au niveau microscopique on peut caractériser la capacité à se déformer à partir d'un temps associé au matériau et à la température et dénommé temps de relaxation caractéristique.

Dans le cas du verre, ce temps diminue rapidement à mesure que la température augmente et le matériau flue comme un liquide très visqueux. Il n'existe pas une valeur de température critique où le matériau passerait soudainement de l'état solide à l'état liquide. comme pour l'eau à 0 degré. Le verre à température ambiante serait donc un liquide extraordinairement visqueux dont la constante de temps pour la déformation est extrêmement longue.

On parle de **transition vitreuse**.

voir M&M page 256

Pour en savoir plus

5/2 Aciers refroidis et cassés

Fragile : se dit d'un matériau qui se rompt sans prévenir, de façon brutale et sans déformation permanente à la rupture (on peut recoller les morceaux d'un vase en porcelaine brisé !). Le verre, l'os, la fonte sont des matériaux fragiles.

Ductile : le contraire de fragile. Se dit d'un matériau apte à la déformation et donc à la mise en forme par écoulement (plasticité et viscosité). Le cuivre, l'étain, le plomb sont ductiles à température ambiante.

On peut plier une feuille ou déformer un fil de ces métaux sans qu'il se rompe.

Quand vous étirez un cylindre de plasticine refroidi, il se casse. Observez le faciès de la cassure.

Il est intéressant de noter que, dans le cas de la rupture "**fragile**", la quasi totalité de l'énergie apportée est dissipée dans la création des surfaces de rupture.

Lorsque **la ductilité** apparaît, l'énergie disponible pour la création de nouvelles surfaces est plus faible, car une part importante de l'énergie mécanique est dissipée par la déformation. Il en résulte une nette différence dans la morphologie du faciès de rupture, et souvent dans l'étendue de l'aire de fissuration.



Pour en savoir plus

5/3 Plus c'est chaud, mieux ça coule

La température rend compte de l'énergie d'agitation des molécules qui constituent le liquide : plus il est chaud, plus cette énergie est grande. Elle aide les molécules à se choquer et à se faufiler entre elles, et donc le liquide à s'écouler. Sa viscosité diminue.

Dans un moteur de voiture froid, l'huile est visqueuse et coule lentement : le moteur doit donc travailler davantage pour surmonter la friction interne. Lorsque le moteur est chaud, la *pégosité* de l'huile est faible, mais elle doit rester suffisamment grande pour maintenir son rôle de film protecteur. Pour limiter les différences de viscosité à froid et à chaud, on ajoute des additifs à base de polymères (huile multigrade), ce qui permet d'utiliser la même huile toute l'année.

A température ambiante, un échantillon de bitume s'écoulera en quelques années, de verre en quelques secondes à 600 °C et des millions d'années à 400 °C.

6

Un matériau sollicité à vitesse élevée adopte un comportement caractéristique d'un solide. A faible vitesse, il s'écoule et se présente comme un liquide.

La **fragilité** et son contraire, la **ductilité**, ne sont pas des propriétés intrinsèques des matériaux. Le temps, au travers de la durée d'observation ou de la vitesse de sollicitation, est aussi déterminant que le chaud et le froid sur le comportement fragile ou ductile d'un matériau.

Ce phénomène concerne les matériaux qui nous entourent. On peut le vérifier chez soi avec un mélange de maïzena et d'eau. Cependant, les temps caractéristiques diffèrent énormément d'un matériau à l'autre : de l'ordre de la seconde pour le miel, de l'heure pour une lave volcanique, d'une journée à plusieurs années pour un glacier ; mais il faut attendre des millions d'années pour percevoir les mouvements géologiques responsables des massifs montagneux.

Le rapport du temps caractéristique du matériau au temps de la sollicitation, le nombre de Deborah, noté *De*, permet de distinguer simplement un comportement **solide** (*De* grand) ou **liquide** (*De* petit).

Un matériau sollicité à vitesse élevée adopte un comportement caractéristique d'un solide. A faible vitesse, il s'écoule et se présente comme un liquide.

La **fragilité** et son contraire, la **ductilité**, ne sont pas des propriétés intrinsèques des matériaux. Le temps, au travers de la durée d'observation ou de la vitesse de sollicitation, est aussi déterminant que le chaud et le froid sur le comportement fragile ou ductile d'un matériau.

Ce phénomène concerne les matériaux qui nous entourent. On peut le vérifier chez soi avec un mélange de maïzena et d'eau. Cependant, les temps caractéristiques diffèrent énormément d'un matériau à l'autre : de l'ordre de la seconde pour le miel, de l'heure pour une lave volcanique, d'une journée à plusieurs années pour un glacier ; mais il faut attendre des millions d'années pour percevoir les mouvements géologiques responsables des massifs montagneux.

Le rapport du temps caractéristique du matériau au temps de la sollicitation, le nombre de Deborah, noté *De*, permet de distinguer simplement un comportement **solide** (*De* grand) ou **liquide** (*De* petit).



Solide ou liquide ? une question de temps !

Cette horloge molle illustre l'effet du temps sur la matière : tirez vite sur un boudin de pâte, il se casse ; tirez doucement, il s'allonge continûment.

• Élément d'un tableau de l'atelier de Robert ©Maison pour tous - Saint-Savin (Aube)
• Glacier en mouvement (Massif du Mont-Blanc) ©Micanozolo-Fotolia.com

• Quand le temps s'écoule ©SR-Optima

Ça coule ou ça coule pas ?

6/1

Ces tubes contiennent de l'eau, du miel et du ketchup.

Retourner-les si nécessaire et comparez comment leur contenu s'écoule.



Comment faire couler le ketchup ?

Que retenir ?

Un liquide ordinaire - ici l'eau et le miel - s'écoule de façon continue. Le débit est proportionnel à la différence de pression entre la surface et le fond du tube où se trouve l'orifice.

Il dépend de la **viscosité** du fluide, c'est-à-dire de la **résistance à l'écoulement**.

Le ketchup, lui, ne s'écoule pas spontanément. Comme d'autres **fluides à seuil** (yaourt, dentifrice, colle, peintures anti-gouttes, bitumes...), il ne se met en mouvement que si on le soumet à une assez grande pression ou si on le secoue avant de le faire s'écouler, ce qui casse des liaisons chimiques.

Comme d'autres liquides, il a un comportement plus complexe, que la simple valeur de sa viscosité ne suffit pas à décrire. La **rhéologie** est la science de ces écoulements.

sur une idée de Patrice Jenffer (Université d'Orsay)

Solide ou Liquide ?

6/2

Une histoire de temps

Ces deux cylindres contiennent le même fluide.

Tournez celui de droite lentement d'un tiers de tour et relâchez-le d'un coup.

Puis tournez celui de gauche rapidement d'un tour, relâchez-le.

Pourquoi ces différences ?

Que retenir ?

Ce fluide est appelé viscoélastique. Son comportement dépend de l'intensité et de la durée de la sollicitation.

Si la contrainte s'exerce durant un temps important, il se comporte comme un fluide (cylindre de droite).

Si la contrainte est brusque, il se comporte comme un solide et casse (cylindre de gauche).

idée et réalisation : Serge Mora - Laboratoire Charles Coulomb (CNRS et Université de Montpellier)

Ça coule comme un liquide, ça casse comme un solide !

6/3

Retournez le dispositif si nécessaire et observez l'écoulement du liquide.

Comment se comporte-t-il ?

Que retenir ?

Sous l'effet de leur poids, l'eau, l'huile ou le miel s'écoulent en formant un filet continu qui finit par se rompre en gouttelettes s'il devient trop fin.

Ce **fluide viscoélastique** se comporte de manière tout à fait différente : d'abord il s'écoule mais quand le filet devient trop long, il casse net, comme du verre.



Ce matériau est constitué d'un réseau de liens microscopiques qui se réorganise en permanence. Si les liens ont le temps de se réorganiser, le filet s'étire comme un liquide. Au-delà d'une certaine longueur, une fracture apparaît qui se propage trop vite pour que les liens puissent se reformer : il casse comme un solide.

idée et réalisation : Serge Mora - Laboratoire Charles Coulomb (CNRS et Université de Montpellier)



Pour mettre la main à la pâte

6/1 Ça coule ou ça coule pas ?



A faire en classe ou chez soi :

Même l'air a de la viscosité :

Une feuille de papier posée sur une table glisse grâce à la couche d'air sous la feuille.

Que se passe-t-il si la feuille est percée de plusieurs trous ?

Faites glisser une plaque plane sur une surface lisse en présence d'un film d'eau puis d'huile. Comparez.

La viscosité n'explique pas tous les types d'écoulement de la matière :

Le dentifrice ne coule que si la pression appliquée au tube est suffisante.

Pour faire couler du ketchup, il faut secouer préalablement le récipient qui le contient.

Dans la cuisine ou la salle de bain, trouvez d'autres matériaux qui ont le même comportement.

Ces opérations cassent des liaisons entre molécules.

Pour mettre la main à la pâte

6/2 Solide ou Liquide ? Une histoire de temps



A faire en classe ou chez soi :

Le silly putty (que l'on trouve dans les magasins de jeux) illustre l'effet du temps.

il rebondit comme une balle élastique car le temps du rebond est très court.

Posé sur une table, il s'étale lentement comme un miel très visqueux.

On en trouve chez imaginascience :

www.imaginascience.com/boutique/pages/fichedescriptive.php?ref=85#haut



Pour mettre la main à la pâte 6/3 Ça coule comme un liquide, ça casse comme un solide !



A faire en classe (inspiré de www.fondation-lamap.org/) : **Liquide / Solide**

1- Où avez-vous déjà rencontré ces mots ? à l'école (ou au collège), à la maison, en dehors.

2- Faites élaborer une définition collective de ces deux mots.

3- Faites réaliser une petite expérience scientifique autour d'eux. Puis revenez sur le point 2.

4- Avez-vous déjà rencontré ces mots dans les livres, les bandes dessinées...

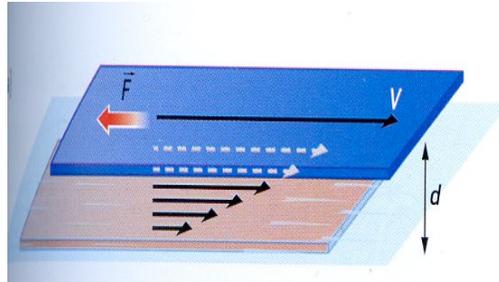
A faire chez soi :

Dans la cuisine ou la salle de bain, trouvez d'autres matériaux qui coulent comme un liquide puis cassent comme un solide.

On rencontre des fluides ayant une structure comparable dans des produits alimentaires (texture des gelées que l'on remue avec une cuillère).



6



Pour en savoir plus

6/1 Ça coule ou ça coule pas ?

La **viscosité** est une caractéristique des fluides simples comme l'eau ou l'air. Elle varie dans une très large gamme dans les liquides.

La force F qui s'exerce entre deux plaques parallèles séparées par un fluide est d'autant plus grande que les surfaces en contact avec les liquides sont grandes, que la séparation d est faible et la différence de vitesse entre les plaques V est élevée.

La **lubrification** permet de faciliter le glissement d'un solide sur un autre par la présence d'une mince couche de liquide. C'est le cas des huiles de moteur. C'est aussi elle qui rend compte du fonctionnement des sports de glisse.



Dans certains matériaux, les forces entre les molécules du fluide bloquent les mouvements relatifs, comme pour un solide, tant que les contraintes ne sont pas suffisantes pour les désolidariser et en permettre l'écoulement. On parle de **fluides à seuil**.

Pour en savoir plus

6/2 Solide ou Liquide ? Une histoire de temps



Le terme **viscoélastique** se rapporte à des matériaux présentant un comportement intermédiaire entre liquide visqueux et solide élastique.

Ces matériaux peuvent donc à la fois stocker (le solide) et dissiper (le liquide) de l'énergie ! Le comportement d'un matériau visco-élastique dépend de l'intensité et de la durée de la sollicitation qu'on lui impose.

Les polymères (matières "plastiques") sont visco-élastiques (essayez de porter 10 kg de pommes de terre dans un sac plastique).

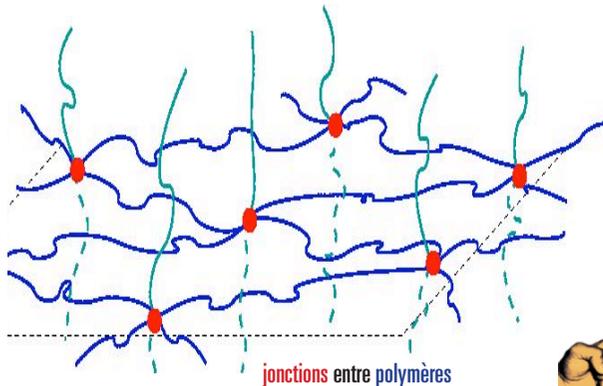


Contrôler la visco-élasticité du caoutchouc permet de combiner sécurité et économie d'énergie dans les transports routiers. Les fabricants donnent aux pneumatiques des propriétés visco-élastiques telles qu'un pneu dissipe peu d'énergie pour des temps de sollicitation qui correspondent à la durée d'un tour de roue (un dixième de seconde) et dissipe bien plus d'énergie sur les temps courts associés à l'adhérence du pneu sur la route (moins d'un millième de seconde s'écoule entre le passage de deux graviers pris dans le bitume). Les pertes d'énergie sont faibles lors du roulement et fortes en cas de freinage.

voir M&M page 257

Pour en savoir plus

6/3 Ça coule comme un liquide, ça casse comme un solide !



Une **fracture** est **ductile** lorsqu'une déformation irréversible précède la rupture finale (le matériau ne recouvre pas sa forme initiale si la charge est supprimée).

Ceci est illustré sur le texte 5/1. La fracture observée dans cette expérience est-elle ductile ou fragile ?

Le fluide présent dans cette expérience est constitué de polymères en solution dans de l'eau.

Ces polymères ont la propriété particulière de pouvoir s'associer entre eux pour former un réseau, un peu comme les voies d'une carte routière, mais dans les trois dimensions de l'espace. De temps à autre, les jonctions entre polymères changent spontanément : ce réseau peut se réorganiser continuellement au cours du temps.

S'il est sollicité doucement, cette réorganisation a le temps de se faire : le fluide s'écoule.

Sinon, le réseau peut "casser" brutalement.



Les polymères sont de grandes molécules, des sortes de filaments microscopiques, parfois ramifiés, qui peuvent soit se trouver dans un liquide ("en solution") soit être simplement entre eux, en bloc. Il existe des polymères naturels (cellulose, amidon, protéines...) ou artificiels (polystyrène, acryliques, silicones, ...).

voir M&M page 308

Depuis plus de 4 000 ans, l'homme élabore et met en forme métaux et alliages métalliques pour en faire des outils ou des éléments de décoration. De la coulée de matériaux fondus, du martelage aux techniques actuelles d'emboutissage, les procédés utilisés pour mettre en forme les métaux ont constamment évolué.

Mais ce n'est que depuis moins d'un siècle que l'on sait interpréter la déformation plastique des métaux et des alliages cristallisés en termes de **dislocations**, qui sont des défauts locaux d'empilements d'atomes.

Les arrangements de tels défauts conduisent à la formation de lignes de **joints** séparant des grains de matière. On les rencontre dans de nombreuses structures présentant des empilements ordonnés (de billes, de grains de colloïdes, ou d'atomes).

Les déplacements irréversibles de ces frontières sont à l'origine de la **plasticité** des matériaux (fer, cuivre, aluminium...). Cette mobilité explique la ductilité des métaux purs qui est utilisée dans les procédés d'emboutissage. Au contraire, dans un alliage (acier, bronze, duralumin), la mobilité des dislocations est réduite et le matériau devient moins déformable plastiquement et plus résistant.

7

Depuis plus de 4 000 ans, l'homme élabore et met en forme métaux et alliages métalliques pour en faire des outils ou des éléments de décoration. De la coulée de matériaux fondus, du martelage aux techniques actuelles d'emboutissage, les procédés utilisés pour mettre en forme les métaux ont constamment évolué.

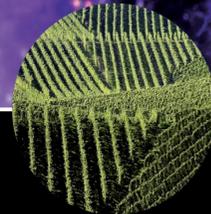
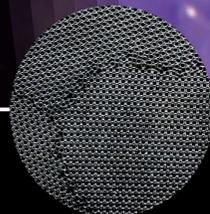
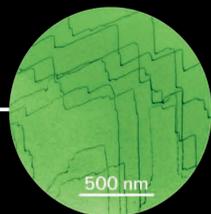
Mais ce n'est que depuis moins d'un siècle que l'on sait interpréter la déformation plastique des métaux et des alliages cristallisés en termes de **dislocations**, qui sont des défauts locaux d'empilements d'atomes.

Les arrangements de tels défauts conduisent à la formation de lignes de joints séparant des grains de matière. On les rencontre dans de nombreuses structures présentant des empilements ordonnés (de billes, de grains de colloïdes, ou d'atomes).

Les déplacements irréversibles de ces frontières sont à l'origine de la **plasticité** des matériaux (fer, cuivre, aluminium...). Cette mobilité explique la ductilité des métaux purs qui est utilisée dans les procédés d'emboutissage. Au contraire, dans un alliage (acier, bronze, duralumin), la mobilité des dislocations est réduite et le matériau devient moins déformable plastiquement et plus résistant.

Dislocations et rupture

"Les gens sont comme les cristaux : ce sont leurs défauts qui les rendent intéressants."
Charles Frank, physicien anglais (1993)



• Dislocations - dans un cristal de silicium (sa microscopie électronique) ©J.Rubin-Portier
- dans un empilement de billes ©PP-Brénaux
- dans des vagues de Jura ©EG-Limoux

• Défauts dans un cristal de quartz ©M.Tech-Femila.com

• A la plume de l'emboutissage. Œuvre de D. Tinker ©TR-San Francisco

Propagation de fracture dans le silicium cristallin

Cisaillements en cascades

7/1

Tapotez **très doucement** le haut du sablier ou, si besoin, retournez-le.

Comment se comporte le sable qui s'écoule dans la partie haute ?
Dans la partie basse ?

Que retenir ?

Le sable situé dans la partie haute se met en mouvement et tombe dans la partie basse. À la verticale de l'orifice par lequel il s'échappe se forme un cratère plus ou moins régulier.

Dans la partie haute, l'écoulement déstabilise la masse de sable qui perd sa cohésion. Il se produit une succession irrégulière de ruptures dues à la séparation des petits grains précédemment agrégés. Le sable se comporte alors comme un solide.

En revanche, une fois mis en mouvement, il coule par l'orifice comme un liquide. Pourtant, arrivé dans la partie basse, il ne forme pas une flaque horizontale (comme on pourrait s'y attendre de la part d'un liquide) mais un tas pointu : c'est un solide granulaire.

sur une idée de Jean-Christophe Géminard (ENS Lyon) et Francisco Melo (Université de Santiago du Chili)

Dislocations et défauts

7/2

Les billes d'acier se répartissent de la même manière que les atomes ou les molécules de certains solides.

Agitez **doucement** la plaque, le réseau de grains se disloque selon des lignes que vous pouvez repérer.

Que retenir ?

La grande majorité des matériaux solides (métaux, céramiques, minéraux des roches...) présente une structure cristalline constituée de grains qui s'assemblent en structures régulières. Des défauts s'y glissent parfois et perturbent la régularité du motif. On parle de **dislocations**.

Dans un matériau, le déplacement de ces dislocations permet à ce matériau de se déformer plastiquement sans casser. Résistant à toutes sortes de contraintes (traction ou compression, flexion, torsion) le matériau peut ainsi être laminé, tréfilé, forgé, embouti, estampé ou plié pour réaliser formes et volumes complexes.

sur une idée d'Olivier Dauchot (ESPCI-ParisTech)

Déchirements dans un matériau granulaire

7/3

Secouez **doucement** le lit de microbilles disposé sur la membrane en caoutchouc pour l'égaliser.

Abaissez **lentement** le plateau à l'aide des deux poignées. observez les déchirements successifs qui se produisent en surface.

Que retenir ?

Un matériau granulaire comme le sable est constitué de petits grains solides serrés les uns contre les autres. Si les grains sont très petits ou que le sable est humide, les grains s'agglutinent. Le matériau est alors dit **cohésif**. Soumis à une contrainte, il casse comme un solide fragile.

Imposer une déformation à la membrane revient à imposer une déformation à la fine couche de sable qui la recouvre ce qui produit un joli réseau de fractures. Supprimer la déformation guérit le matériau dont les grains s'agglutinent à nouveau.

La distance entre les fractures dépend de l'épaisseur de la couche de sable. Plus celle-ci est épaisse, plus les mailles du réseau sont grandes.

sur une idée de Jean-Christophe Géminard (ENS Lyon) et Francisco Melo (Université de Santiago du Chili)



Pour mettre la main à la pâte

7/1 Cisaillements en cascades



A faire en classe ou chez soi :

Remplissez partiellement de sable ou de petits grains (semoule, farine...) deux bouteilles en plastique transparent. Mettez les bout à bout par leur col de façon étanche. Observez la formation des cônes d'avalanches et des écoulements d'une bouteille à l'autre. Etudiez les angles limites suivant la taille de l'orifice, la nature des grains et les blocages, particulièrement pour des grains allongés (comme du riz).

Remplissez partiellement (au tiers) de sable deux bouteilles transparentes. Complétez le remplissage de l'un avec de l'eau. Fermez les deux bouteilles et couchez-les. Observez et comparez la formation des pentes d'avalanche dans chacun des récipients. Refaites l'expérience avec le récipient contenant de l'eau, mais en le tapotant avant de le coucher. L'avalanche sera limitée.



Pour mettre la main à la pâte

7/2 Dislocations et défauts



A faire en classe ou chez soi :

Regardez comment s'organisent les bulles sur une mince couche de mousse d'un bain moussant ou les palets d'un jeu de dame que l'on tasse à plat. Remplissez d'eau à mi-hauteur un grand plat et versez à sa surface des billes de polystyrène de même diamètre. Comment s'organisent les billes avec le temps ?

Recherchez autour de vous des défauts d'organisations naturelles (comme l'exemple des vignes donné en illustration).

Pour mettre la main à la pâte

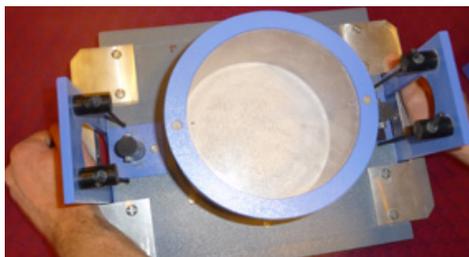
7/3 Déchirements dans un matériau granulaire



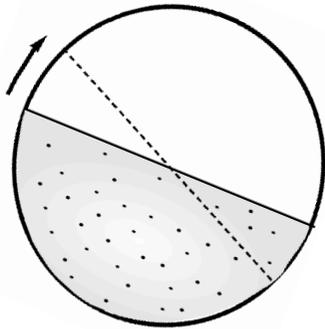
A faire en classe ou chez soi :

Vous pouvez reproduire l'expérience de l'exposition : Munissez-vous d'un gant de cuisine en latex, d'un gant que l'on trouve près des pompes à gazoil ou d'un bas.

Mettez-le bien à plat sur un cylindre (un verre ou un pot de confiture par exemple). Déposez dessus une mince couche de farine puis étirez-le ensuite avec les deux mains.



7



Pour en savoir plus

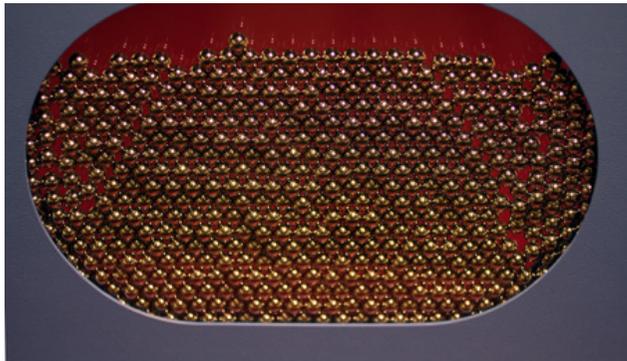
7/1 Cisaillements en cascades

L'angle maximal que peut former un empilement de grains avec l'horizontale est communément appelé «angle d'avalanche». Lorsque cet angle est dépassé, la surface du matériau se met à couler. L'avalanche s'arrête pour un angle plus faible, dit «angle de repos» avec l'horizontale. Ces angles dépendent de la forme des grains (sphériques ou anguleux), de leur nature (sableux, argileux...), de leur rugosité, de la géométrie de l'empilement, de la cohésion... (voir aussi expérience 14/2) En fonction de leur taille et des conditions ambiantes (l'humidité de l'air en particulier), les grains formant un matériau granulaire ou une poudre sont plus ou moins cohésifs. Si la force qui lie les grains entre eux n'est pas négligeable devant leur poids, le matériau aura tendance à casser et à se fracturer comme un solide. Dans la partie haute d'un sablier on observe la formation d'un cratère irrégulier par une succession d'avalanches le long de la pente.

Une fois séparés les grains ne collent plus entre eux et le matériau coule comme un liquide par l'orifice. Cependant, en se déposant sur le fond, les grains forment un tas qui montre qu'ils ne se comportent cependant pas de manière usuelle (ni solide, ni liquide).

La formation du tas est très étroitement liée au fait que les grains appuient de leur poids les uns sur les autres. Maîtriser ces phénomènes est important pour de nombreuses applications industrielles, du simple conditionnement des poudres commerciales (médicaments, sucre, café, lessive...) à la préparation des combustibles de fusées ou missiles.

voir M&M page 297



Pour en savoir plus

7/2 Dislocations et défauts

Deux choses sont visibles dans cet empilement plan de billes : des zones avec empilement périodique, avec des orientations différentes, séparées par des rangées étroites de billes plus ou moins bien ordonnées : il s'agit de **joints de grains** !!! Et dans des régions avec empilement périodique, de temps en temps, on observe des défauts localisés d'empilements : ce sont les **dislocations**. Dans ce dernier cas les lignes de dislocation sont à imaginer comme étant perpendiculaires au plan

Les déformations résultant de la propagation de ces dislocations permet aussi à une pièce de résister à la rupture en cas d'accident : la déformation absorbe l'énergie du choc. Ainsi, la voiture se déforme lors d'un choc, mais protège les occupants ; la ceinture de sécurité se détend aussi irréversiblement pour amortir le choc.

Voir M&M page 143



Pour en savoir plus

7/3 Déchirements dans un matériau granulaire

En général, pour des grains assez gros (plus de 1/10 mm de diamètre typiquement), en l'absence d'humidité, rien ne "colle" les grains entre eux et ils peuvent être séparés les uns des autres sans effort. Soumis à une contrainte, le matériau "coule" tel un liquide, comme on peut le voir dans un sablier.

Pour mettre en évidence cette différence de comportement, on utilise une fine couche de grains déposés sur une membrane élastique, ce qui permet de réaliser le même type d'effet qu'avec une feuille de papier que l'on déchire (voir expériences 8).

On observe, dans le cas du matériau cohésif, que la déformation de la couche conduit à la formation d'un joli réseau de fractures tandis que, en l'absence de cohésion la couche s'étale simplement. Notez que supprimer la déformation permet de faire disparaître les fractures (le matériau "guérit" car les grains collent à nouveau entre eux).

Une feuille de papier que l'on déchire, la carlingue d'avion qui se disloque, un édifice qui s'écroule, une fissure qui se propage dans un verre ou un métal... tous ces phénomènes de rupture dépendent de la taille, de la forme et de la répartition des hétérogénéités présentes dans les matériaux et à leur surface.

A l'issue d'un choc ou au terme d'un chargement, la rupture s'initie au voisinage de défauts (microfissures, inclusions, accidents de forme...) qui concentrent les contraintes. Au bord d'un trou circulaire, la contrainte est **trois fois supérieure** à la contrainte moyenne ! Mais, en revanche, la présence de trous en tête d'une fissure peut empêcher sa propagation.

On sait aujourd'hui que la fragilité de l'acier utilisé (en raison d'une teneur en soufre trop élevée) et le choix d'un assemblage par rivetage pour la coque du Titanic (ou pour le fuselage des avions Comet) ont favorisé l'initiation et la propagation des fissures. D'ailleurs la coque du Titanic 2 dont on annonce la construction sera assemblée par soudage !

Prévoir la tenue en service et éviter la rupture d'une pièce sous chargement est un sujet majeur en science des matériaux.

8

Une feuille de papier que l'on déchire, la carlingue d'avion qui se disloque, un édifice qui s'écroule, une fissure qui se propage dans un verre ou un métal... tous ces phénomènes de **rupture** dépendent de la taille, de la forme et de la répartition des hétérogénéités présentes dans les matériaux et à leur surface.

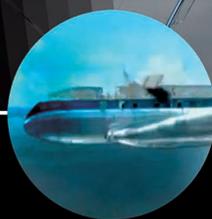
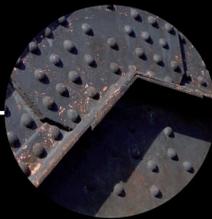
A l'issue d'un choc ou au terme d'un chargement, la rupture s'initie au voisinage de défauts (microfissures, inclusions, accidents de forme...) qui concentrent les contraintes. Au bord d'un trou circulaire, la contrainte est **trois fois supérieure** à la contrainte moyenne ! Mais, en revanche, la présence de trous en tête d'une fissure peut empêcher sa propagation.

On sait aujourd'hui que la fragilité de l'acier utilisé (en raison d'une teneur en soufre trop élevée) et le choix d'un assemblage par rivetage pour la coque du Titanic (ou pour le fuselage des avions Comet) ont favorisé l'initiation et la propagation des fissures. D'ailleurs la coque du Titanic 2 dont on annonce la construction sera assemblée par soudage !

Prévoir la tenue en service et éviter la rupture d'une pièce sous chargement est un sujet majeur en science des matériaux.

Zéro défaut?

La présence de défauts ou d'impacts dans un matériau fragile peut être l'amorce d'une rupture soudaine.



• Alignement de rivets ©PP-Neuville-xxx-Bio
• Reconstitution de l'explosion d'un Comet en 1954 ©Comet Crash documentary © Tube
• La face d'un écran de smartphone ©IS-01/ans

• Site d'un impact localisé ©Microscopie-Fordita.com



Contraintes et défauts

8/1

Ces quatre plaques sont insérées entre deux films polarisants. Allumez la lampe en appuyant sur le bouton.

En tirant **doucement** sur les poignées, faites apparaître des irisations.

Comparez la disposition des irisations autour des défauts.

Que retenir ?

Ce procédé permet de visualiser les déformations engendrées par des contraintes.

Si vous étirez une plaque ne présentant aucun défaut, les irisations se répartissent de manière régulière sur sa surface.

Si la plaque est percée d'un trou circulaire, la contrainte au bord de cet orifice est trois fois plus forte qu'ailleurs.

Une fente dans la plaque va concentrer sur ses bords une contrainte qui peut être cent fois supérieure à la contrainte subie par les autres zones de la surface.

Lorsqu'avec son diamant ou sa roulette en acier (ou bien en carbure de tungstène), le vitrier trace sur la plaque de verre une fine rayure, il crée un défaut autour duquel la contrainte sera si intense que le verre se cassera suivant cette ligne.

sur une idée d'Anne Tanguy (Université Lyon 1)

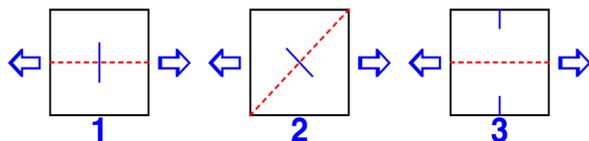
Déchirez en tout sens

8/2

Pliez une feuille de papier selon l'un des trois schémas (pointillés rouges).

A l'aide d'une paire de ciseaux, faites une entaille

- soit verticale au centre (1),
- soit en diagonale (2),
- soit une double entaille sur deux bords opposés de la feuille (3).



Déchirez la feuille en tirant les bords opposés. Comparez les déchirures.

Que retenir ?

Normalement, les déchirures se produisent perpendiculairement à la force de traction exercée.

Soumise à une force horizontale, la première feuille, qui a été entaillée verticalement, se déchire bien selon cette direction.

Entaillée obliquement, la deuxième finit de se déchirer selon la verticale.

On s'attendrait à ce que la troisième feuille se déchire verticalement et que les deux entailles se réunissent au milieu.

Il n'en est rien ! Les déchirures changent de direction, leurs extrémités semblent vouloir s'éviter comme si elles ne s'aimaient pas. L'extrémité de l'une contourne l'autre qu'elle rejoint plus loin à angle droit.

Ce phénomène est lié à la façon dont l'énergie élastique, moteur de la propagation de la déchirure, se répartit dans la feuille.

sur une idée de Loïc Vanel (LPMCN - Lyon 1)

Comment se développe une fissure ?

8/3

Ces quatre plaques sont insérées entre deux films polarisants. Allumez la lampe en appuyant sur le bouton.

En tirant **doucement** sur les poignées, faites apparaître des irisations.

Comparez la disposition des irisations autour des fissures.

Que retenir ?

En présence d'une fissure, les irisations, donc les déformations, se concentrent à l'extrémité du défaut. Si on tirait plus fort, la fissure se propagerait jusqu'à fendre la plaque.

Tous les bons bricoleurs savent qu'un trou percé à l'extrémité d'une fissure disperse en partie la contrainte et stabilise la fissure qui ne s'allongera pas.

Si deux fissures sont présentes sur une même plaque, les déformations se concentrent principalement à l'extrémité de la plus longue. Si on tirait plus fort, seule cette dernière se propagerait.

Si on perce de petits trous au-dessus d'une fissure, les déformations se dispersent tout autour. Loin de fragiliser la plaque, ces trous lui permettent de mieux résister.

sur une idée de Daniel Bonamy (CEA - Saclay)

Pour mettre la main à la pâte

8/1 Contraintes et défauts



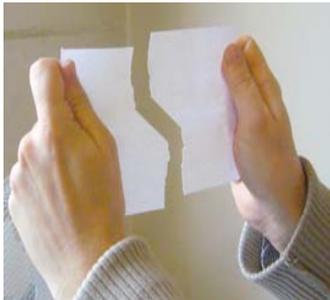
A faire en classe ou chez soi :

Préparez des carrés de feuille de papier d'environ 10x10 cm (par exemple une feuille de papier normale coupée en 8). Il est très difficile de couper un carré de papier en tirant latéralement dessus. Mais si vous faites une petite entaille sur un bord, il devient beaucoup plus facile de faire grandir cette fissure et ainsi de séparer la feuille en deux morceaux !

Refaites l'expérience en faisant, au milieu de la feuille, un petit trou, une fente de quelques centimètres. Comparez les déchirures et l'effort fait pour déchirer la feuille.

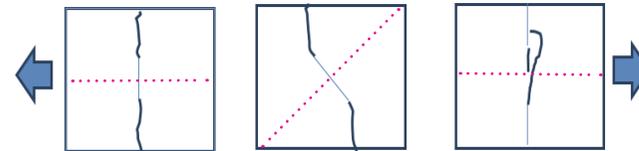
Pour mettre la main à la pâte

8/2 Déchirez en tout sens



A faire en classe ou chez soi :

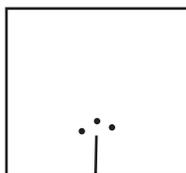
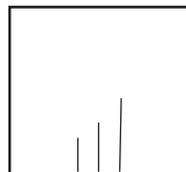
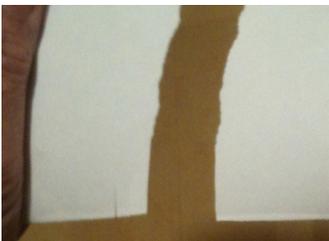
Il est facile de refaire ces expériences chez vous avec différents types de papier et différents types de fentes. En refaisant ces expériences avec des tranches de Comté ou de vrai gruyère (sans trou), vous obtiendrez des fissures en volume.



Pour découper une fente dans un carré de papier, il suffit de le plier en deux suivant les lignes pointillées rouges du dessin et de couper au bon endroit.

Pour mettre la main à la pâte

8/3 Comment se développe une fissure ?



A faire en classe ou chez soi :

Il est facile d'illustrer cet effet de sélection du plus grand défaut à partir d'une feuille de papier. Prenez une feuille de papier vierge et introduisez sur un bord, à l'aide de ciseaux, plusieurs fentes parallèles de longueur variable. Lorsque vous tirerez sur cette feuille [perpendiculairement aux fentes bien sûr !], vous verrez que seule la plus grande fente se met à grandir ! Et cela quelque soit la place de la plus grande fente.

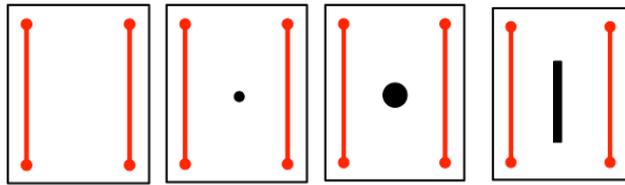
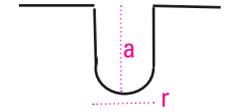
Refaites l'expérience en ne faisant qu'une seule petite fente mais en faisant au-dessus plusieurs petits trous. Cette propriété est utilisée par les artisans pour empêcher une fente de se développer dans certains matériaux. ils font un petit trou au-dessus de la fente.

8

Pour en savoir plus

8/1 Contraintes et défauts

Une rayure de profondeur a et de rayon r en profondeur multiplie la contrainte par la racine carrée de a/r . La rayure introduite à l'aide d'une roulette de vitrier est très fine et est alors suffisante pour diminuer jusqu'à cent fois la contrainte à fournir pour découper la plaque de verre !



1

2

3

4

Cette effet de concentration des contraintes est générale. On peut aussi le constater dans une plaque de PVC, de métal ou même de bois.

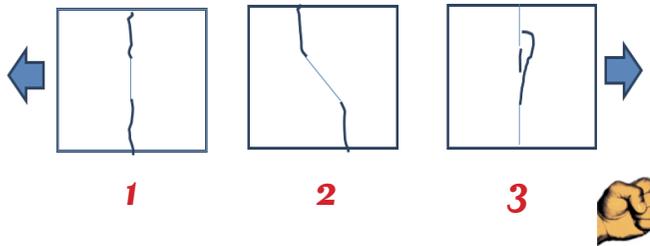
La ténacité d'un matériau exprime la résistance qu'il oppose à la propagation d'une fissure. La ténacité du verre ou de la porcelaine est typiquement 10 à 100 fois plus petite que celle d'un métal.

Pour en savoir plus

8/2 Déchirez en tout sens

Normalement les fissures se propagent perpendiculairement à la direction dans laquelle on tire. Si la fissure est inclinée (2), alors la fissure change de direction pour se propager perpendiculairement à la tension de la feuille.

L'évitement des pointes de fissure dans la situation (3) est un phénomène qui demeure mal compris. Lorsque par la suite, la pointe d'une fissure rejoint le côté d'une autre fissure à angle droit, elle arrive dans une zone où la tension de la feuille est localement parallèle à la fissure cible. La fissure continue donc en fait à se propager perpendiculairement à la tension locale.



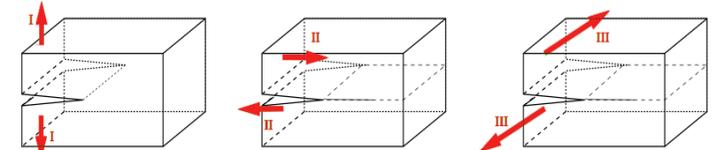
1

2

3

Peut-être s'explique-t-il par le passage d'un mode de rupture à un autre.

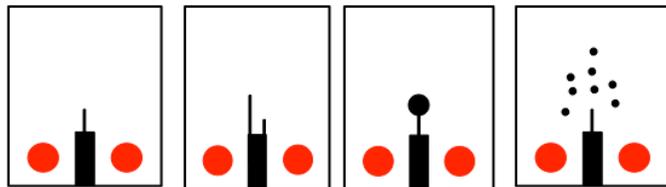
Les différents modes de rupture sont :
 Mode I : écartement.
 Mode II : cisaillement plan.
 Mode III : cisaillement hors plan.



Pour en savoir plus

8/3 Comment se développe une fissure ?

Si l'on observe une plaque avec une fissure (1), on voit les couleurs, c'est-à-dire les déformations, se concentrer à la pointe du défaut. Si on pouvait tirer plus fort, la fissure se propagerait jusqu'à casser la plaque. En présence de deux fissures de longueurs différentes (2), les irisations se concentrent principalement autour de la fissure la plus grande qui fait écran à la propagation de contraintes. Seule cette dernière grandirait si l'on continuait à tirer.



1

2

3

4

Un trou percé en pointe de fissure (3) défocalise les irisations. Il va donc permettre de stabiliser la fissure et empêcher celle-ci de s'étendre. C'est ce que savent très bien les bons bricoleurs. En présence de petits trous placés un peu partout (4), on perturbe la concentration des contraintes en pointe de fissure. Autrement dit, des trous ne fragilisent pas le matériau mais on contraire lui permettent de mieux résister à la fracture.

Un échantillon de grès poreux est ainsi moins fragile qu'un morceau de verre qui pourtant partage quasiment la même composition chimique !

9

Il y a choc mécanique lorsque deux objets se heurtent. L'énergie et la quantité de mouvement qui les animent sont plus ou moins modifiées :

- dans le **choc dur** (élastique) entre deux boules de pétanque, la somme des énergies cinétiques des boules est conservée et la boule frappée "en carreau" part à la vitesse de la boule incidente qui reste sur place.

- dans le **choc mou** (inélastique) du poing d'un boxeur contre un sac de sable, l'empreinte du gant du boxeur s'imprime sur la paroi, l'énergie cinétique est transformée essentiellement en chaleur et en déformation plastique due aux déplacements des grains dans le sac.

Entre ces deux situations extrêmes, beaucoup d'autres sont possibles. Elles dépendent de la façon dont l'énergie cinétique est restituée après le choc, de la balle de tennis qui rebondit sur le court au marteau qui enfonce un clou sans rebondir.

Un choc est un phénomène rapide; il favorise donc un comportement fragile. L'**endommagement** résultant peut prendre la forme de fissures, de craquelures ou d'éclats, comme lors de l'impact d'un corps dur sur une vitre ou d'une explosion : une petite météorite peut engendrer la formation explosive d'un grand cratère !

Il y a choc mécanique lorsque deux objets se heurtent. L'énergie et la quantité de mouvement qui les animent sont plus ou moins modifiées :

- dans le **choc dur** (élastique) entre deux boules de pétanque, la somme des énergies cinétiques des boules est conservée et la boule frappée "en carreau" part à la vitesse de la boule incidente qui reste sur place.

- dans le **choc mou** (inélastique) du poing d'un boxeur contre un sac de sable, l'empreinte du gant du boxeur s'imprime sur la paroi, l'énergie cinétique est transformée essentiellement en chaleur et en déformation plastique due aux déplacements des grains dans le sac.

Entre ces deux situations extrêmes, beaucoup d'autres sont possibles. Elles dépendent de la façon dont l'énergie cinétique est restituée après le choc, de la balle de tennis qui rebondit sur le court au marteau qui enfonce un clou sans rebondir.

Un choc est un phénomène rapide; il favorise donc un comportement fragile. L'**endommagement** résultant peut prendre la forme de fissures, de craquelures ou d'éclats, comme lors de l'impact d'un corps dur sur une vitre ou d'une explosion : une petite météorite peut engendrer la formation explosive d'un grand cratère !

Du singe au goéland, beaucoup d'animaux ouvrent des graines ou des coquillages en les cassant avec des pierres ou en les faisant tomber sur le sol.

Chocs et rebonds



• Goéland cassant un coquillage ©MB-La Touffe
• Un "casseur" à la pétanque ©Thomas Duret-Fotolia.com
• Choc classique du cadre, des cordes et de la balle ©Miquel-Fotolia.com
• Meteor Crater dans l'Arizona - 1,2 km de diamètre ©J.Schreiber-Dufkay.com

• Cassant casser des noix de coco ©Sipa press



Chutes de météorites

9/1

Secouez **doucement** le tiroir pour égaliser la surface du sable. Laissez tomber les 2 billes de la même hauteur.

Comparez les tailles des cratères.



Que retenir ?

Les billes sont différentes par leur masse et créent des cratères de taille différentes. En analysant en laboratoire l'impact d'une bille d'acier sur un lit de poudre, on peut relier son énergie cinétique (associée au mouvement) et le diamètre du cratère laissé par l'impact. On peut ainsi évaluer la masse et la vitesse des météorites.

Les impacts sur le sol des corps de plus de quelques kilogrammes laissent des cratères de quelques mètres à quelques kilomètres de diamètre.

On estime que, chaque année, près de 20 000 tonnes de matière venant de l'espace atteignent la surface terrestre (océans compris).

sur une idée de Patrice Jenffer (Université d'Orsay)

Des matelas "intelligents"

9/2

Remontez les barres verticales si nécessaire ; elles se bloquent.

Laissez tomber les barres de toute leur hauteur en tirant **doucement** sur les tiges latérales.

Quelle différence observez-vous lors des chocs ?



Que retenir ?

Sur la mousse blanche, la bille est totalement amortie. Sur l'autre, elle rebondit. Lors d'une chute, le choc déforme les objets. S'ils sont élastiques, en reprenant leur forme, ça rebondit. S'ils sont plastiques, ils ne reprennent pas leur forme, ça amortit.

C'est en sautant dessus qu'on choisit sa literie : ferme, ça rebondit, le matelas garde sa forme ; souple, ça amortit, le matelas s'écrase.

Cette mousse à mémoire de forme pour matelas et oreillers fait mieux. Tout en restant ferme, elle se déforme plastiquement lors de la chute et amortit complètement la bille – et vos lombaires. Viscoélastique, elle ne reprend lentement sa forme qu'une fois la charge retirée.

sur une idée de Tristan Baumberger (INSP-Université Paris 6)
avec le concours de la société Tempur

Des pneus noirs mais verts !

9/3

La balle noire est faite de caoutchouc vulcanisé normal, l'autre d'un caoutchouc modifié.

Remontez les balles à une extrémité de la piste et lâchez-les en même temps.

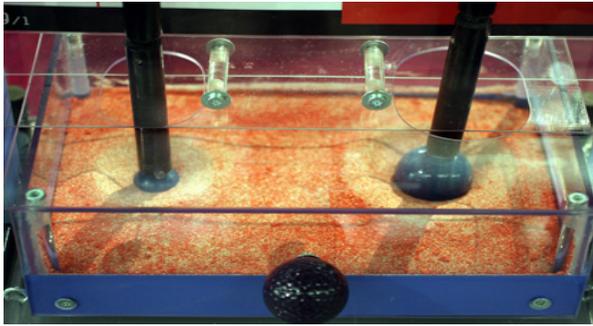
Les deux balles oscillent. Laquelle est freinée le plus rapidement ?

Que retenir ?

Lors du roulement des balles de caoutchouc, elles se déforment de façon irréversible. Cela a pour effet qu'une partie de l'énergie cinétique (liée au mouvement) est perdue sous forme de chaleur au lieu d'être restituée par le rebond : les balles ralentissent et s'arrêtent.

C'est de la suie, une fine poudre de noir de carbone, qui donne sa couleur au caoutchouc des pneus. Ce noir de carbone a été ôté à 97% de l'autre balle et remplacé par des nanoparticules de silice. Ce caoutchouc siliceux (on parle aussi de "pneu vert") dissipe moins d'énergie en roulement tout en conservant les mêmes qualités d'adhérence à la piste. La balle modifiée roule plus longtemps.

idée et réalisation de l'entreprise Michelin (Clermont-Ferrand)



Pour mettre la main à la pâte

9/1 Chutes de météorites



A faire en classe ou chez soi :

Etudiez l'impact de billes sur un sol sableux suivant la hauteur de la chute, la taille et la masse des billes. Le diamètre du cratère est une mesure de l'énergie absorbée.

On peut constater la formation d'une légère pointe de sable à la verticale de la bille lorsque celle-ci a pénétré dans le sable et qui est due à la réorganisation du sable au moment de l'impact (voir 9/1).



A Rochechouart en France, un météorite tombé il y a deux cent millions d'années a causé un cratère d'une vingtaine de kilomètres de diamètre.



Pour mettre la main à la pâte

9/2 Des matelas "intelligents"



A faire en classe ou chez soi :

Etudiez l'impact de billes d'acier sur différents petits matelas de mousse.

Posez une petite balle élastique (ou non élastique) sur une grosse balle élastique et faites tomber sur le sol l'ensemble des deux balles en contact.

Au rebond, la grosse balle ne rebondit pratiquement pas et la petite part à grande hauteur même si cette balle est molle.

Voir aussi les jeux de www.imaginascience.com référencés n° 14 (Astroblaster) et 88 (Mégapops)



Pour mettre la main à la pâte

9/3 Des pneus noirs mais verts !



A faire en classe ou chez soi :

Des bocaux cylindriques de fer, de carton ou de verre qui accélèrent en roulant sur un plan incliné permettent de mesurer l'effet de l'accélération de la pesanteur.

L'effet du frottement est beaucoup moins considérable que pour des objets qui accélèrent en glissant sur une couche inclinée lisse.

Comparez le temps de chute sur une distance donnée suivant le taux de remplissage du bocal (plein, vide ou partiellement rempli). Suivant la nature des grains et le taux de remplissage, on observe différents régimes d'écoulement et même l'arrêt de la rotation.

Vous pouvez refaire l'expérience de l'exposition avec les "balles déroutantes" de www.imaginascience.com référencées n° 50 en laissant tomber les deux balles en même temps et de même hauteur.



Pour en savoir plus

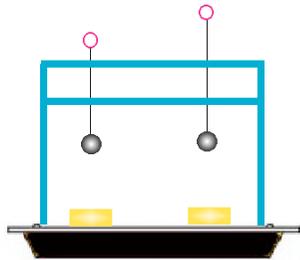
9/1 Chutes de météorites

Dans une collision, la quantité de mouvement totale (le produit de la vitesse par la masse) de deux corps qui se choquent se conserve. Au moment du choc entre deux objets, ceux-ci sont déformés. Dans un choc inélastique, une partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur et utilisée pour créer une déformation des corps. C'est le cas dans la chute de météorites sur Terre.

Dans un choc élastique, toute l'énergie mise en jeu dans la déformation est totalement restituée après le choc : l'énergie cinétique totale avant le choc est égale à celle après le choc. Dans ce cas, on peut prévoir la vitesse après le choc en exprimant la conservation de l'énergie et celle de l'impulsion. Ceci permet de rendre compte de deux situations limites :

- dans le rebond d'un objet sur le sol (considéré comme ayant une masse infinie) la vitesse après rebond est égale et opposée à celle avant le choc,
- dans la collision d'une sphère avec une sphère identique au repos, l'énergie cinétique et la quantité de mouvement de la première sphère sont intégralement transférées à la seconde. C'est le cas du "tir à carreau" dans les jeux de boules.

voir M&M page 39



Pour en savoir plus

9/2 Des matelas "intelligents"

Dans un choc inélastique, une partie de l'énergie incidente est perdue pour le rebond et sert à déformer de façon irréversible les objets qui sont entrés en collision. Dans la limite d'un choc mou toute l'énergie est absorbée par le choc et contribue à l'échauffement au niveau de la zone de contact.

Les amortisseurs, comme par exemple les tampons entre wagons, doivent absorber le choc sans occasionner de rebond. Ils doivent comporter une partie élastique (un ressort) qui accepte la déformation et une partie qui joue le rôle d'un piston et qui amortit le choc et évite le rebond.

Les cellules fermées de la mousse traditionnelle jouent le rôle de petits ballons qui permettent à la bille de rebondir sans perdre beaucoup d'énergie.

Les matelas comme celui qui est utilisé dans l'expérience ont une structure alvéolée qui est déformée par l'impact et où le déplacement de l'air interne absorbe l'énergie du choc.

Un autre domaine d'application concerne les semelles de chaussures qui permettent d'absorber le choc au moment du contact de la chaussure avec le sol.



voir M&M page 38



Pour en savoir plus

9/3 Des pneus noirs mais verts !

Dans le roulement, une roue reste en contact permanent avec le sol et la zone de contact qui est déformée est renouvelée en permanence. Cette zone subit une alternance de compressions et d'extensions.

Dans le cas élastique (un pneu bien gonflé) et une chaussée lisse l'énergie perdue est faible, ce qui est recherché. Au contraire dans le freinage, les pneus dits intelligents doivent absorber l'énergie du mouvement (d'ailleurs ils chauffent !).



Pour comprendre les paradoxes du roulement et du freinage, il faut réaliser que la relation entre la contrainte et la déformation n'est pas instantanée et que la quantité d'énergie restituée après le contact est fonction de la fréquence à laquelle est sollicitée le pneu.

voir M&M page 75

10

Depuis les percuteurs en silex ou en os de l'Antiquité, l'homme casse, broie, martèle, lisse, polit, écrase, hache, râpe...

Dans ces cas, la fragilité de certains matériaux n'est pas un défaut : elle offre des avantages pour tailler, découper ou broyer, comme le démontrent nos outils de cuisine.

Chaque année, l'industrie broie et transforme des milliards de tonnes de matériaux pour en faire des grains. Après les liquides, c'est la forme de matière la plus utilisée par l'homme.

Les broyeurs de roche permettent d'extraire les minerais mais fournissent aussi des granulats de toutes tailles, du sable de mer ou de rivière au sablon. Les meules et moulins réduisent les grains en farine.

La production de grains est nécessaire pour des utilisations dans tous les domaines de la technologie. Mais il s'agit de techniques très peu efficaces surtout pour obtenir des petits grains : le "cantonier qui casse des tas de cailloux" consacre beaucoup plus d'énergie inutilisable à les échauffer dans le choc qu'à fournir l'énergie nécessaire pour fracturer la pierre. L'énergie consommée par les opérations de broyage est estimée à 10 % de l'énergie totale consommée sur terre.

Depuis les percuteurs en silex ou en os de l'Antiquité, l'homme casse, broie, martèle, lisse, polit, écrase, hache, râpe...

Dans ces cas, la fragilité de certains matériaux n'est pas un défaut : elle offre des avantages pour tailler, découper ou broyer, comme le démontrent nos outils de cuisine.

Chaque année, l'industrie broie et transforme des milliards de tonnes de matériaux en grains. Après les liquides, c'est la forme de matière la plus utilisée par l'homme.

Les broyeurs de roche permettent d'extraire les minerais mais fournissent aussi des granulats de toutes tailles, du sable de mer ou de rivière au sablon. Les meules et moulins réduisent les grains en farine.

La production de grains est nécessaire pour des utilisations dans tous les domaines de la technologie. Mais il s'agit de techniques très peu efficaces surtout pour obtenir des petits grains : le "cantonier qui casse des tas de cailloux" consacre beaucoup plus d'énergie inutilisable à les échauffer dans le choc qu'à fournir l'énergie nécessaire pour fracturer la pierre. L'énergie consommée par les opérations de broyage est estimée à 10 % de l'énergie totale consommée sur terre.



Un tunnelier casse, broie et pulvérise les roches d'un tunnel souterrain, ce que la dentition fait à petite échelle pour nous alimenter... ou nous défendre !

Trancher casser, broyer



• Silex de néolithique ©BRAP-Quinze
• Broyeur casse, broyer dans sa cuisine ©L. Saint-Denis-de-l'Hôtel

• Les tunneliers avecent de plusieurs écrivains de mines par jour ©SYTRAL-Nicolas BABIN



Du grain... à moudre

Observez les grains broyés sous la pierre.

10/1

Que retenir ?

Battre, briser, broyer, concasser, égruger, fatiguer, piler, pulvériser, triturer... sont autant d'actions permettant de réduire à volonté la dimension de toutes sortes de matériaux du bloc de pierre au grain de céréale.

Il existe beaucoup de manières de réduire un corps en très petites parcelles : on peut l'écraser pour le fractionner, le râper pour faire sauter des écailles, frotter sa surface pour l'abraser...

Chaque habitant de notre planète utilise en moyenne une tonne de matériaux broyés par an. L'énergie dépensée pour le cassage est supérieure à celle consommée pour le transport.

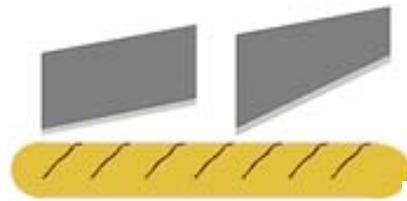


sur une idée d'Anne Tanguy (Université Lyon1)

Coupez, tranchez !

Formez un cylindre avec la pâte à modeler et placez-le dans l'appareil.

Appuyer sur chaque lame et observez comment se fait la découpe.



10/2

Que retenir ?

La lame inclinée, celle d'une paire de ciseaux ou de cisailles, est l'outil le plus efficace pour couper car les matériaux résistent moins au cisaillement qu'à la compression.

Dans la cuisine, au bureau, à l'usine... on tranche verticalement des matériaux aussi variés que l'acier, le verre époxy, le plastique, le bois, le papier et bien sûr des aliments grâce au massicot, à la guillotine, à la hache, à la trancheuse, au fil mais aussi aux ultrasons, au laser, jet d'eau...



Dans l'industrie, on recherche des techniques d'usinage toujours plus précises pour contrôler les déformations que produit le cisaillement sur les bords de la coupure afin d'obtenir des pièces ayant la forme et les dimensions souhaitées.

sur une idée d'Anne Tanguy (Université Lyon1)

Cassez des spaghettis !!!

Prenez un spaghetti par les deux bouts.
Courbez-le et essayez de le briser en un minimum de morceaux.

10/3

Que retenir ?

Pourquoi un spaghetti cru et sec se casse rarement en deux morceaux ?

Cette question a préoccupé un prix célèbre prix Nobel de physique, Richard Feynman, et a valu à deux chercheurs français le Ig Nobel* de Physique 2006.

Il se produit bien, d'abord, une cassure unique. Mais, des ondes mécaniques parcourent la tige dans sa longueur juste après cette première rupture. Ces "vagues" augmentent la courbure locale de la tige et déclenchent de nouvelles ruptures. Souvent le bout central est éjecté vers l'avant.

* Prix remis chaque année par "les Annales de la Recherche Improbable" et qui récompense une recherche qui "fait rire avant de faire réfléchir".

sur une idée Basile Audoly et Sébastien Neukirch *
(Université Pierre et Marie Curie, Paris 6)

Pour mettre la main à la pâte

10/1 Du grain... à moudre

A faire en classe ou chez soi :



Identifier les outils de cuisine utilisés pour diminuer la taille de graines ou d'autres grains solides : le moulin à café, à poivre ou à légumes, le casse noix ou tout simplement le couteau, le hachoir, la râpe en précisant le résultat obtenu.

Identifier la granulométrie dans un de ces exemples avec une loupe et au toucher.

Comparer l'efficacité du broyage dans le cas du casse noix, suivant l'angle de présentation de la noix dans sa mâchoire.

Sauriez-vous faire la différence entre grains de sable marins ou fluviaux ?



Pour mettre la main à la pâte

10/2 Coupez, tranchez !

A faire en classe ou chez soi :



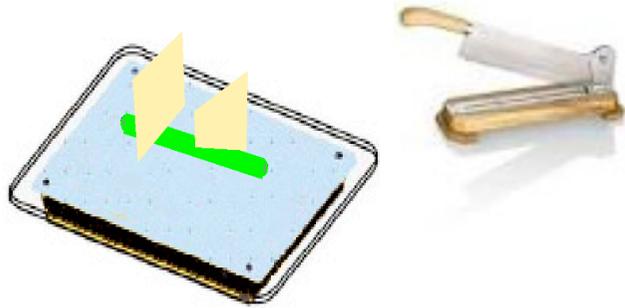
Procurez-vous une feuille de papier pliée, du pain frais ou rassis, du gruyère...

Coupez-les avec un couteau tranchant avec ou sans dents, un coupe papier, un coupe pain.

Observez à chaque fois la coupe.

Ce n'est pas toujours le même outil qui fait la coupe la plus nette.  Attention à la manipulation d'un couteau bien affûté !

Dans la cuisine ou chez le charcutier ou le boucher, trouvez d'autres instruments coupants.



Pour mettre la main à la pâte

10/3 Cassez des spaghettis !!!

A faire en classe ou chez soi :



Reproduisez chez vous l'expérience de rupture des spaghettis crus en les tenant par les deux bouts !

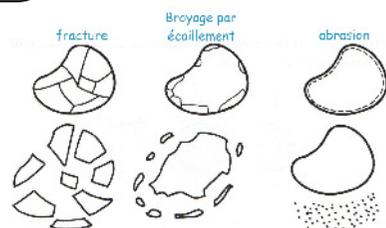
Ceci peut aussi être fait en courbant le spaghetti en le posant bien verticalement et en le courbant par l'autre extrémité ou en tapant dessus par le haut.

Le spaghetti se casse généralement en plus de deux morceaux.

Essayez de les casser en seulement deux morceaux.



10



Pour en savoir plus

10/1 Du grain... à moudre

Il y a plusieurs façons de diminuer la taille d'un grain : en le fracturant, ce qui divise le grain en plusieurs parties de tailles comparables, ou en arrachant des fragments de sa surface, ce qui se passe aussi dans l'usure et produit des grains de beaucoup plus petites tailles ou des poudres à côté du grain principal. Généralement l'opération produit une large distribution de tailles et est couplée au tamisage par classes en commençant par les plus gros grains.

Un granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui forment des familles selon leur calibre et qui permet de les séparer par tamisage (cailloux, graviers, sables, limons, argiles...). Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.



On peut formaliser l'opération en exprimant que la variation temporelle d'une classe donnée de grains résulte de l'addition de nouveaux grains provenant de la séparation de grains plus gros diminuée de la disparition de grains de cette taille donnée donnant des fragments plus petits.

voir M&M page 295



Pour en savoir plus

10/2 Coupez, tranchez !

La coupe la plus efficace se fait par cisaillement (avec une lame inclinée), car le matériau est en général moins résistant au cisaillement qu'à la compression.

Pour aider la coupe, certains appareils industriels ajoutent une vibration à la lame, qui permet d'augmenter localement l'énergie fournie pour séparer les éléments.

L'efficacité d'une coupe dépend du tranchant de l'outil, de son angle d'ouverture et des propriétés mécaniques de l'objet à couper, mais aussi de la vitesse de la coupe.

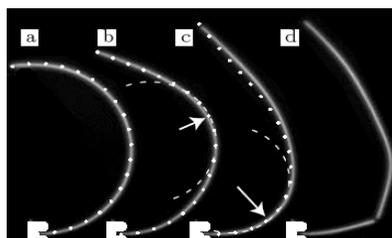


Le tranchant d'un couteau peut être amélioré en redressant les irrégularités du fil (affiler), ce que fait le « fusil » du boucher, ou encore en l'affinant par l'intermédiaire d'une pierre à affuter recouverte d'une fine poudre dure.

Couper un mille feuille de pâtisserie constitué d'une alternance de couches molles et dures n'est pas facile. Le couteau tranche facilement la couche dure mais au niveau des pâtes molles la coupe se disperse.

Dans une coquille de nacre, l'alternance de couches dures (carbonate de calcium ou aragonite) et de couches plus tendres (conchyoline, complexe de macromolécules organiques) assure la résistance du matériau.

Gravure de Galilée



Pour en savoir plus

10/3 Cassez des spaghettis !!!

Galilée s'est posé la question suivante : pourquoi ne peut-on pas casser une tige facilement en la tirant dessus alors qu'il est facile de casser une tige qui est fixée à une extrémité et qu'on courbe en appuyant à l'autre extrémité. L'explication simple tient dans le fait qu'il y a un effet de bras de levier et que l'effort qui est exercé à l'extrémité libre que l'on fléchit est multiplié par le rapport des longueurs entre cette longueur et celle de la zone où elle est attachée.

La première rupture d'une tige que l'on courbe se produit généralement là où la courbure est la plus forte. Lorsqu'on la courbe la tige, la contrainte se propage par une onde acoustique qui se propage le long de la tige et qui est réfléchiée à ses extrémités. C'est elle qui cause l'augmentation de la déformation qui entraîne la rupture.

La souplesse des nouvelles perches de saut permet à l'athlète de stocker l'énergie cinétique de la course sous forme d'énergie élastique de courbure lorsque la perche s'appuie sur le sol juste avant le saut ; celle-ci est restituée pendant la phase ascendante du saut. La perche peut se casser là où la courbure est plus élevée ou a une hétérogénéité ! Cette première cassure accidentelle, donne naissance à une onde mécanique qui se propage le long de la tige et crée un excédent de courbure à une certaine distance de la coupe, ce qui donne lieu presque instantanément une autre rupture. On observe que la perche se casse en trois branches en général. Cette rupture est un effet dynamique et dépend de la vitesse à laquelle la poutre est courbée.

11

Comme l'a montré le géomètre Carl Gauss, sur une sphère on ne peut pas appliquer une feuille sans la plisser ou l'étirer. D'ailleurs, les planisphères ne reproduisent pas exactement les cartes qui sont tracées sur des mappemondes.

Pour bien appliquer les vêtements sur les formes de nos corps, les couturiers ont recours à des plis. Ces mêmes vêtements font apparaître, à l'usage, de nouveaux plis et froissés.

Plis de vêtements, rides sur la peau, feuilles froissées... les déformations des surfaces sont fréquentes dans la vie courante.

Ces phénomènes de pliage ou de froissage se retrouvent dans des domaines aussi différents que les plis des feuilles des plantes à l'intérieur des bourgeons ou le déploiement des ailes d'un papillon qui émerge de sa crysalide.

Autres sujets actuels de la recherche :

- comment l'action de l'eau et la chaleur du fer à repasser agissent-elles sur les fibres du tissu pour former ou faire disparaître les plis ?
- comment plier puis déplier un panneau solaire embarqué dans un satellite ?
- comment modéliser et simuler numériquement les plis des vêtements et reproduire les mouvements et les pliages en images de synthèse ?

Comme l'a montré le géomètre Carl Gauss, sur une sphère on ne peut pas appliquer une feuille sans la plisser ou l'étirer. D'ailleurs, les planisphères ne reproduisent pas exactement les cartes qui sont tracées sur des mappemondes.

Pour bien appliquer les vêtements sur les formes de nos corps, les couturiers ont recours à des plis. Ces mêmes vêtements font apparaître, à l'usage, de nouveaux plis et froissés.

Plis de vêtements, rides sur la peau, feuilles froissées... les déformations des surfaces sont fréquentes dans la vie courante.

Ces phénomènes de pliage ou de froissage se retrouvent dans des domaines aussi différents que les plis des feuilles des plantes à l'intérieur des bourgeons ou le déploiement des ailes d'un papillon qui émerge de sa crysalide.

Autres sujets actuels de la recherche :

- comment l'action de l'eau et la chaleur du fer à repasser agissent-elles sur les fibres du tissu pour former ou faire disparaître les plis ?

- comment plier puis déplier un panneau solaire embarqué dans un satellite ?

- comment modéliser et simuler numériquement les plis des vêtements et reproduire les mouvements et les pliages en images de synthèse ?



L'élégance des plissés de la collerette ou les rides peu désirables du visage de ce tableau de Rembrandt montrent comment de fines surfaces répondent aux contraintes.

Plisser froisser

• Robes plissées au fer à vapeur ©Henry Miyake, styliste japonais
• Plis sculptés - Buste d'Auguste ©Olivier de Versailles/Jean-Marc Manzi
• Écllosion d'un coquelicot ©Frederic-Fondis.com
• Jeu de plis en images de synthèse ©ISIC-Columbia & Hebrew Universities

• Détail du portrait du pasteur Wenzloper par Rembrandt
©Rijksmuseum, Amsterdam



Mises en plis

11/1

Que retenir ?

Sous l'effet de la contrainte de compression exercée dans l'axe longitudinal de la feuille, celle-ci flambe. Selon l'intensité de la contrainte, on voit apparaître une succession de plis plus ou moins réguliers. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les plaques terrestres se plissent jusqu'à former des montagnes.

Poussez la feuille transparente entre les deux plaques.

Observez comment les plis se forment petit à petit.



Cette facilité de plissement apparaît aussi dans de nombreux systèmes où une interface matérielle est présente : les cloques des peintures ou le délaminage de films, les membranes biologiques, certaines macromolécules, les nanotubes ou encore les plaques tectoniques en géophysique.

sur une idée de Benoît Roman (ESPCI-ParisTech)

Boulettes fractales

11/2

Que retenir ?

Le poids d'une sphère pleine est proportionnel à son volume (sa taille à la puissance 3). Les boulettes de papier, qu'on peut assimiler à des sphères, dérogent à cette loi. Leurs poids augmentent moins vite que leurs volumes parce que plus elles sont grosses plus elles renferment de vide.

Prenez une boulette de papier et mesurez son diamètre y .
Dépliez-la et mesurez son côté x .
Placez le point de coordonnées (x,y) sur le papier quadrillé.

Qu'observez-vous ?

Observez les plis de la feuille puis reformez la boule pour le visiteur suivant.

La ligne droite sur la feuille de papier quadrillé vous montre la relation mathématique entre le diamètre et la taille de la feuille.



Sur la courbe on voit que le volume augmente comme le côté du carré de papier à la puissance 2,2. On dit que la dimension fractale de la boule est de 2,2.

On comprend mieux quand on déplie la feuille de papier froissé : les plis qui se forment le long de lignes reliées entre elles limitent la possibilité de se compacter plus et, ce, de plus en plus quand la taille de la boulette augmente.

sur une idée de Henri Van Damme (Ifsttar-Nantes) et d'Arezki Boudaoud (ENS-Lyon)

Cartes routières et voiles solaires

11/3

Que retenir ?

Dès notre plus jeune âge, nous sommes familiarisés avec les pliages des vêtements, des draps, des papiers... Les Japonais ont érigé le pliage au rang d'art, appelé **origami**, pour produire des volumes incroyablement divers à partir d'une simple feuille de papier. Koryo Miura, un astrophysicien nippon, a conçu un panneau solaire qui se déplie et se replie, comme cette feuille de papier.

Pliez et dépliez cette feuille en agissant sur la boule.
De nombreux sites Internet vous expliqueront comment réaliser vous-même ce pliage, appelé « Miura Ori ». Le panneau « plisseur » illustre une application multiséculaire de ces techniques pour les grands couturiers.

Pour plier ces cartes routières, les parachutes ou les voiles solaires des satellites, l'homme s'inspire des plissements de nombreux organismes vivants, le papillon qui sort de sa chrysalide, le coquelicot de sa coque.

sur une idée d'Arezki Boudaoud (ENS Lyon)



Pour mettre la main à la pâte

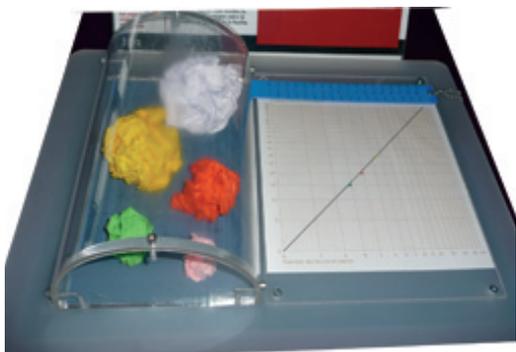
11/1 Mises en plis



A faire en classe ou chez soi :

On peut voir des motifs de plissement plus complexes quand on met une serviette (ou mieux une feuille de plastique) entre deux bols transparents (en verre) identiques.
Dans ce cas, pas besoin de cales, c'est la courbure des bols (des mâchoires de compression) qui impose la présence de plis sur la périphérie de la feuille.

Chez vous, trouvez dans les vêtements, ceux qui sont volontairement plissés (chemises, robes, jupes, pantalons...).
Observez un pantalon ou une chemise "fatigués" et les plis qui se trouvent aux ... plis du genou ou du coude !



Pour mettre la main à la pâte

11/2 Boulettes fractales



A faire en classe ou chez soi :

Faites une boule de papier froissé puis peignez la boule avec une bombe de peinture.
Laissez sécher et dépliez la boule et observez les zones de plis.
Pour une même surface de papier, plus une boule est grosse, moins elle est compacte à cause de l'énergie à fournir pour créer des plis très courbés.

Découpez une bande dans du papier journal.
Pliez la bande en 2 puis à nouveau en 2. Répétez l'opération un nombre maximum de fois.
Combien de fois avez-vous plié la bande de papier ? Essayez avec une bande plus longue, avec un papier plus fin !



Pour mettre la main à la pâte

11/3 Cartes routières et voiles solaires



A faire en classe ou chez soi :

Refaites vous-même ces pliages en suivant les plans de montage sur :
http://240plan.ovh.net/~upngmmxw/fold/pliage_f.htm ou sur www.youtube.com/watch?v=eH8A1kFJ_Lo
voir aussi : www.cs.columbia.edu/cg/ESIC/video.mov

Observez comment sont plissés les lampions japonais, les éventails. Trouvez chez vous d'autres objets plissés.
Essayez de faire la toupie origami de la vidéo : www.dailymotion.com/video/x19awiw_toupie-origamie_tech

11

Pour en savoir plus

11/1 Mises en plis

Voir la définition de "**Flambage**" panneau 3 et expérience 3-1

Plus on veut écraser la feuille, plus il faut appuyer avec une force qui augmente très rapidement.

C'est parce que deux effets se conjuguent : d'une part on a de plus en plus de plis à écraser, d'autre part les plis sont plus petits. Or plier une plaque demande des forces d'autant plus grandes que le pli est fin.

Lorsqu'on comprime le système, l'écrasement n'est pas continu, mais saccadé. C'est parce que les instabilités se produisent brutalement.



Plaques et feuilles minces, mises en plis ou alvéolées, permettent de réaliser dans l'industrie des structures robustes de moindre poids grâce à leur légèreté doublée d'une résistance mécanique (structures creuses, lamellaires ou en nid d'abeille...). Les plissés interviennent aussi dans les réalisations des couturières pour l'aisance d'un vêtement et surtout pour l'élégance vestimentaire. (voir petites tables m/6 et m/7)

Pour en savoir plus

11/2 Boulettes fractales

On forme des boulettes de tailles différentes faites avec du papier de même épaisseur. Si l'objet était compact on s'attendrait à ce que le volume augmente comme la surface de la feuille, qui conserve la même épaisseur, c'est-à-dire comme son poids. En fait elles croissent moins vite, c'est-à-dire que la boulette contient de plus en plus de vide en grossissant, et que les plis se développent.

C'est une belle illustration de **forme fractale** : quel que soit le matériau froissable que vous preniez, quelle que soit la boule que vous fassiez, le point placé sur le papier sera toujours situé au voisinage de la même droite. La pente de cette droite, tracée en coordonnées logarithmiques permet d'évaluer la dimension fractale des boules de papier, proche de... 2,2. Ceci est caractéristique d'un objet fractal dont la dimension est intermédiaire entre celle d'une surface ($D=2$) et d'un volume ($D=3$). Cette dimension fractale donne une image de la complexité du froissé de l'objet et renseigne sur la densité de la boule.



Pour en savoir plus

11/3 Cartes routières et voiles solaires

Un **origami** (de "oru" : plier et "kami" : papier) utilise une feuille pliée de façon telle qu'elle reproduise un motif en volume. La cocotte en papier est la référence... pour mauvais (mais pas en tout !) élèves.

La zone de pli d'une feuille crée une surépaisseur et a un coût énergétique d'énergie de courbure d'autant plus élevé que la feuille est épaisse. Partant d'une grande feuille mince (par exemple une double page de journal) que l'on plie en deux un certain nombre de fois on constate qu'il est difficile de pouvoir faire plus de 7 plis successifs.

Une fois en orbite, un satellite doit pouvoir déplier une voile solaire qui contribuera à sa propulsion ou une photopile qui recueillera la lumière solaire pour fournir l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation de la cellule. Ceci demande d'assurer un pli correct.

C'est aussi le cas de la toile du parachutiste qui doit s'ouvrir et se déplier en cours de chute sans former des plis au départ d'une chute en vrille.

L'origine de l'origami pourrait remonter à la découverte de la fabrication du papier, vraisemblablement en Chine, au début du IIe siècle.

D'abord réservés à des usages religieux (mariages ou gri-gri), les pliages utilitaires (sachets, boîtes à épices, becs verseurs...) apparaissent au XVIIe siècle.



12

Une affiche arrachée, une feuille de papier déchirée, un ruban adhésif qui se décolle mal du rouleau, l'ouverture d'une enveloppe plastique... font apparaître des formes qui nous semblent banales mais qui sont étonnamment structurées. La régularité des déchirures est utilisée par l'artiste Jacques Villeglé qui collectionne, depuis 1948, des affiches déchirées par des passants.

Pourquoi certaines déchirures se développent-elles pour finir en pointe ? Pourquoi d'autres font-elles apparaître des bords dentelés, identiques à différentes échelles comme les bords d'une feuille de salade ? Pourquoi d'autres encore se développent-elles de façon oscillante ?

Lorsque l'on sollicite fortement (en lacérant ou en arrachant) une feuille d'un matériau donné, la déformation devient irréversible : quand la sollicitation s'arrête, le matériau reste déchiré.

Des boîtes de conserve aux sachets apéritifs en passant par les pochettes CD, la déchirure est aussi nécessaire pour ouvrir aisément les emballages.

Une affiche arrachée, une feuille de papier déchirée, un ruban adhésif qui se décolle mal du rouleau, l'ouverture d'une enveloppe plastique... font apparaître des formes qui nous semblent banales mais qui sont étonnamment structurées. La régularité des déchirures est utilisée par l'artiste Jacques Villeglé qui collectionne, depuis 1948, des affiches déchirées par des passants.

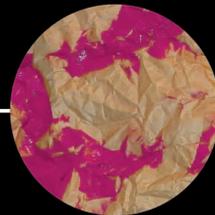
Pourquoi certaines déchirures se développent-elles pour finir en pointe ? Pourquoi d'autres font-elles apparaître des bords dentelés, identiques à différentes échelles comme les bords d'une feuille de salade ? Pourquoi d'autres encore se développent-elles de façon oscillante ?

Lorsque l'on sollicite fortement (en lacérant ou en arrachant) une feuille d'un matériau donné, la déformation devient irréversible: quand la sollicitation s'arrête, le matériau reste déchiré.

Des boîtes de conserve aux sachets apéritifs en passant par les pochettes CD, la déchirure est aussi nécessaire pour ouvrir aisément les emballages.

Les déchirures,
un sujet qui déchire !
Et qui intéresse vandales,
artistes et géomètres.

Déchirer lacérer



- Boîte de papier peinté pour défilés ©PB-Olives
- Bords ondulés des sigales d'une orchidée ©CBR-Paris
- Jeans usés ou à la mode ? ©MSPhotographic-Fotolia.com
- Outil pour ouvrir une boîte de sardines ©Fotolia.com

• Affiche lacérée ©SB-Olives



Déchirer, décoller, même problème !

12/1

Glissez une feuille dans la fente et appuyez sur la boule pour faire deux entailles parallèles partant du bord de la feuille.

Plaquez la feuille sur la table puis tirez **doucement** sur la partie centrale. Quelle forme prend la déchirure ?



Comparez sa pointe avec la déchirure plus large présentée.

Que retenir ?

Les deux entailles convergent jusqu'à se rejoindre et former ces **déchirures** en pointe qu'on retrouve sur beaucoup de matériaux comme le ruban adhésif, le papier peint sec ou les affiches.

Pour un matériau donné, quelle que soit la largeur de la languette sur laquelle on tire, les **pointes triangulaires obtenues sont toujours superposables**. L'angle de la pointe dépend de la flexibilité et de la résistance du matériau ainsi que de son adhérence dans le cas où il est collé.

sur une idée de José Bico et Benoît Roman (ESPCI-ParisTech)

Déchirures oscillantes

12/2

Prenez une feuille plastique. Soulevez la plaque à l'aide des poignées bleues. Placez la feuille sous la plaque, refermez-la et maintenez-la d'une main. De l'autre main, à l'aide du poinçon, percez et déchirez la feuille en suivant une des trois fentes. Quelles formes prennent les déchirures ?

Que retenir ?

Il est difficile de découper une feuille mince avec un gros objet. Pour s'adapter au poinçon, la feuille se plisse. Le poinçon butant sur ce pli, la déchirure se propage d'un côté, s'arrête et repart vers l'autre côté, oscillant avec une étonnante régularité.

Si on perce subitement une mince feuille de caoutchouc tendue (un ballon gonflé par exemple), elle se déchire de façon oscillante.

sur une idée de Benoît Roman (ESPCI-ParisTech)

Quel lien y a-t-il entre un sac plastique et une feuille de salade ?

12/3

Faites une entaille au bord de la feuille et déchirez-la.

Quelle est la forme de la déchirure ?

Que retenir ?

Contrairement aux expériences 12/1 et 12/2 voisines, les feuilles plastiques utilisées ici sont très ductiles et se déforment de façon irréversible au cours de la rupture. On ne peut plus recoller les morceaux. Lorsque la fissure se propage, il y a d'abord étirement irréversible de la feuille puis déchirure.

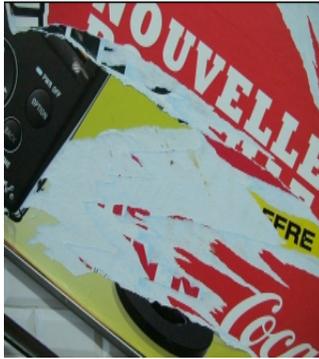
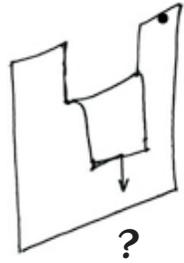
Plus on est proche du bord de la déchirure, plus la déformation le long de la fissure est importante, et plus la feuille est longue. Les ondulations apparaissent pour compenser l'excès de longueur au bord.

On retrouve ce phénomène dans certains végétaux : salades, choux, lichens... qui sont également plus long au bord qu'à l'intérieur.

Elles ont de plus une régularité qui en font des courbes fractales : à différentes échelles, les ondulations sont similaires, même si on n'en comprend pas encore la raison.

sur une idée de Benoît Roman (ESPCI-ParisTech)





Pour mettre la main à la pâte

12/1 Déchirer, décoller, même problème !



A faire en classe ou chez soi :

Faites l'expérience avec des feuilles plastiques, type papier couvrant les bouquets de fleurs. Faites des entailles de départ plus ou moins proches l'une de l'autre.

Refaites l'expérience en partant d'entailles ayant toujours la même taille, mais en tirant plus ou moins rapidement, et observez l'angle de convergence des languettes triangulaires. Plus on tire vite, plus la convergence se fait rapidement et la languette est courte.

Déchirez de la même façon un papier de sachet de gateaux secs, un papier d'emballage.... Essayez de décoller du papier peint, une affiche, un ruban large de vieux papier collant.

Référence vidéo : www.universcience.fr/science-actualites/actualite-as/wl/1248100233523/enfin-explique-le-syndrome-du-ruban-adhesif/

Pour mettre la main à la pâte

12/2 Déchirures oscillantes



A faire en classe ou chez soi :

Pour refaire cette expérience, prenez des plastiques d'emballage de gâteaux biscuits, type Spéculoos. Placez le papier sur une fente faite dans une planche de bois et perforez le papier avec une clé pointue.

Attention les films plastiques sont très anisotropes et il faudra essayer de faire la déchirure dans différentes directions (certaines directions du papier sont plus ductiles que d'autres).

Autre expérience : gonflez un petit ballon de baudruche (ou une partie du ballon s'il a claqué) et percez-le avec une pointe.

voir la vidéo : www.dailymotion.com/video/x1b8bvs_dechirures-oscillantes_tech

Pour mettre la main à la pâte

12/3 Quel lien y a-t-il entre un sac plastique et une feuille de salade ?

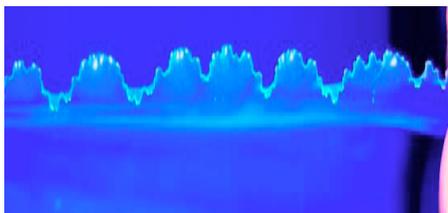
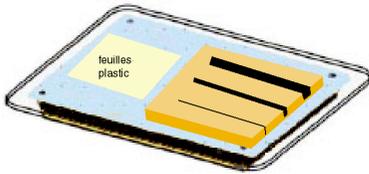


A faire en classe ou chez soi :

Ce phénomène peut être observé avec tous les sacs plastiques qui servent à transporter des objets (mais pas à emballer) : les déformations plastiques sont alors consommatrices d'énergie et rendent donc les sacs plus résistants.

Par exemple, déchirez un sac poubelle en tirant des 2 mains sur un bord. Etirez ensuite le bord entre vos doigts et faites disparaître petit à petit les ondulations. Observez les plus fines qui disparaissent en dernier (regardez aussi comment une tranche fine de bois se comporte M 4).

voir la vidéo : www.knowtex.com/nav/dechirure-du-plastique_11496



12



Pour en savoir plus

12/1 Déchirer, décoller, même problème !

Quand on tire la languette, le pli emmagasine de l'énergie élastique (si on la lâche, elle se déplie).

Le système tend à réduire cette énergie en réduisant la largeur du pli.

Les fissures sont attirées par les zones les plus sollicitées du système, c'est-à-dire celles qui recèlent la plus grande énergie élastique, ici la zone pliée joignant les deux fissures.

Elles sont donc attirées l'une vers l'autre, réduisant progressivement la largeur de la languette.

Un matériau rompt lorsque l'énergie élastique stockée devient trop importante : il devient avantageux de payer le coup énergétique de la rupture qui permet de réduire les déformations du matériau.

Les fissures vont ainsi tendre à relâcher l'énergie élastique de la façon la plus efficace qui soit. L'arrachement d'un morceau de scotch est bien difficile !



Pour en savoir plus

12/2 Déchirures oscillantes

Dans les problèmes de rupture, les physiciens cherchent à prévoir le chemin de fissuration et les instabilités associées.

Ce mode de propagation est tout à fait particulier aux films minces : si on fait une entaille dans un solide épais (une plaque de beurre congelée par exemple), et qu'on y enfonce un couteau bien effilé, les deux côtés du couteau appuient symétriquement sur les deux lèvres de la fissure, et la fissure se propage donc tout droit.

En revanche ici on a un objet beaucoup plus gros que l'épaisseur du film, qui va se courber (plutôt que s'accommoder dans son plan) pour s'adapter à l'indenteur. Ce mode de pliage modifie donc complètement la répartition des efforts.

Les oscillations se décomposent en phases symétriques où la fissure se propage vers un côté et s'arrête. Puis elle redémarre, en changeant de côté. Dans chacune de ces phases, l'indenteur appuie sur un pli, et la fissure se propage (en première approximation) perpendiculairement à ce pli. C'est la direction de propagation la plus efficace.

Une meilleure compréhension de la déchirure des feuilles minces peut permettre de dessiner des emballages plus faciles à ouvrir.

Pour en savoir plus

12/3 Quel lien y a-t-il entre un sac plastique et une feuille de salade ?

Que l'on tire, comprime ou torde un matériau, il se déforme un peu mais reprend sa forme initiale.

C'est une déformation réversible, dite **élastique**.

Si la déformation est plus importante, elle devient irréversible. C'est une déformation **plastique** ou visqueuse.

Près de la pointe de fissure les contraintes sont très fortes et le matériau (**ductile**) s'étire alors de façon irréversible (plasticité). Mais à l'écart du passage de la découpe, le matériau est moins sollicité, et retrouvera son état initial.

On a donc créé un film dont le bord est beaucoup plus long que l'intérieur.

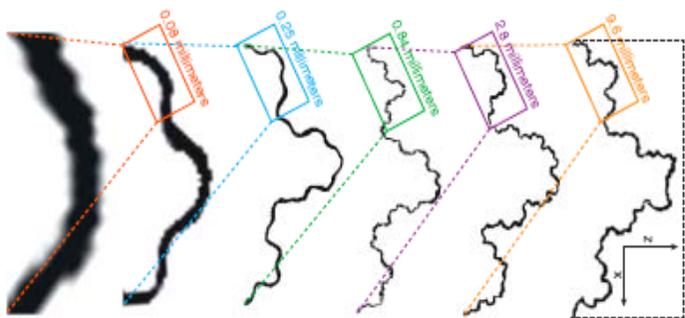
Comme il est très mince, **il flambe**. Il prend ici une forme fractale (des plis dans des plis). C'est encore mal compris.

Il suffit donc d'avoir un bord plus long que l'intérieur pour créer des formes complexes. C'est probablement le mécanisme de formation de pétales ou feuilles complexes : il suffit de programmer une croissance biologique plus rapide au bord.

Inversement il faut prévoir un mécanisme de régulation de la croissance très efficace si on veut obtenir des feuilles bêtement plates : s'il y a des endroits qui grandissent un peu plus ou moins vite que le reste, on fait apparaître des bosses.

On sait bien qu'il est difficile de tricoter une écharpe bien plate. Elle se retrouve fripée si les mailles ne sont pas régulières.

Faut-il donc d'avantage s'émerveiller des feuilles habituelles plates plus que des feuilles complexes des orchidées ?



13

Un bloc collé sur une table ne peut être ni soulevé ni glissé. C'est un exemple d'**adhésion** due à des liaisons chimiques à l'échelle microscopique. La chimie a permis des évolutions récentes des adhésifs et colles que l'on trouve dans les magasins de bricolage. Les assemblages collés sont de plus en plus répandus en construction et dans l'aéronautique en particulier.

Par contre, un bloc posé à sec sur une table horizontale glisse si la force qui le pousse dépasse une valeur seuil proportionnelle à son poids.

Cette force limite définit un **coefficient de frottement statique** qui est le quotient de la force au poids de l'objet. Il est faible pour de l'acier sur la glace et élevé pour du caoutchouc sur une chaussée d'asphalte.

Le **frottement** rend compte aussi bien de l'adhérence en dessous de cette limite que du glissement au-delà.

Nous sommes dans le domaine de la **tribologie**.

La présence d'un film liquide entre la table et le bloc facilite le glissement. On parle de **lubrification**, qui est une caractéristique de la mécanique des fluides.

Un bloc collé sur une table ne peut être ni soulevé ni glissé. C'est un exemple d'**adhésion** due à des liaisons chimiques à l'échelle microscopique. La chimie a permis des évolutions récentes des adhésifs et colles que l'on trouve dans les magasins de bricolage. Les assemblages collés sont de plus en plus répandus en construction et dans l'aéronautique en particulier.

Par contre, un bloc posé à sec sur une table horizontale glisse si la force qui le pousse dépasse une valeur seuil proportionnelle à son poids.

Cette force limite définit un **coefficient de frottement statique** qui est le quotient de la force au poids de l'objet. Il est faible pour de l'acier sur la glace et élevé pour du caoutchouc sur une chaussée d'asphalte.

Le **frottement** rend compte aussi bien de l'adhérence en dessous de cette limite que du glissement au-delà.

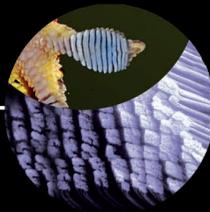
Nous sommes dans le domaine de la **tribologie**.

La présence d'un film liquide entre la table et le bloc facilite le glissement. On parle de **lubrification**, qui est une caractéristique de la mécanique des fluides.



Adhérer ou frotter

Un ensemble des micropoils présents sous la patte du gecko lui permettent d'adhérer et de se déplacer sur des surfaces verticales.



• Grossissement des micropoils d'une patte de gecko ©Kultur/Lewis/Clark Doherty-Portland
• Glisse au bord de l'eau (skimboard) ©Dinh-Fantia.com
• Le curling, jeu olympique de glace ©U.Desset-Fantia.com

• L'adhérence du gecko sur une glace verticale ©Mazod99-Fantia.com



De la colle qui colle ?

Ces plots sont composés de deux blocs collés.

Essayez de décoller celui du dessus.

Quelle est la meilleure colle ?

C'est sec, mais ça colle !

Placez les deux blocs en haut du plateau.
Puis soulevez **lentement** le plateau pour les faire glisser.

À quel moment se mettent-ils en mouvement ?

Recommencez en les plaçant l'un sur l'autre.

Sur la même surface (lisse ou caoutchouc), comparez l'angle de rupture avec différentes faces.

De l'eau qui colle !

Pompez **doucement** pour mouiller la plaque.

Tirez sur la tige pour décoller la feuille.

13/1

Que retenir ?

Deux des quatre collages sont défectueux.

Le 1 : la colle entre les blocs A et B est de mauvaise qualité, elle se sépare en deux couches,
Le 2 : l'adhérence est mauvaise, la colle reste sur un des blocs.

Les deux autres sont efficaces.

Le 3 : on parvient à séparer les blocs mais c'est la matière qui est arrachée et non la colle.
Le 4 : la colle est tout à fait adaptée à la matière et il est impossible de séparer les blocs !

Obtenues par polymérisation, les colles actuelles sont très résistantes, à condition de bien préparer les surfaces. La colle établit des liaisons chimiques avec chaque bloc.

13/2

Que retenir ?

Un bloc posé sur un plan dont on fait varier l'inclinaison reste d'abord immobile. Si la pente atteint un certain seuil, il se met en mouvement subitement et ne s'arrête que s'il rencontre un obstacle. Le bloc lisse amorcera son mouvement en premier, par contre l'adhérence est plus forte pour les surfaces rugueuses.

Quelle que soit la face en contact avec le plateau, les blocs se mettent à glisser à peu près en même temps : l'angle du plateau qui déclenche le mouvement est indépendant des dimensions de la surface apparente de contact ainsi que de la charge.



Ce phénomène physique très commun a été décrit en premier par Léonard de Vinci. Même en l'absence de colle, un bloc posé sur un plan horizontal adhère à la surface grâce aux interactions entre les deux matériaux tant qu'on ne le pousse pas avec une force suffisante.

sur une idée d'Olivier Ronsin (INSP-Paris 6)

13/3

Que retenir ?

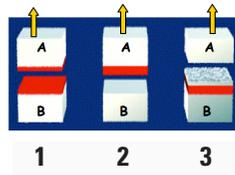
Quand un liquide se répand sur une surface, des forces d'adhésion (les forces capillaires) apparaissent. Ces forces sont dues à la nature des liaisons établies entre les molécules du liquide entre elles ou avec le solide en contact avec lui.

Dans le cas de l'eau, elles sont particulièrement importantes. Ce sont elles qui s'opposent au décollement de la feuille.



Lors du décollement, l'élasticité de la feuille provoque l'apparition de plis qui traduisent différents équilibres entre les forces capillaires et élastiques.

sur une idée d'Arezki Boudaoud (ENS Lyon)



Pour mettre la main à la pâte

13/1 De la colle qui colle ?



A faire en classe ou chez soi :

Sur une plaque de verre, collez une bande de scotch dont une extrémité est libre.
On peut la décoller en tirant sur l'extrémité vers le haut.

Par contre, si on tire parallèlement à la plaque de verre il est très difficile de la décoller de la plaque.
Le gecko décolle ses pattes en soulevant successivement les poils à l'extrémité de celle-ci.
Et non pas en l'arrachant tout d'un coup !

Testez vos colles. Certaines colles (les doubles faces en particulier), ne tiennent pas sur des supports verticaux.

Pour mettre la main à la pâte

13/2 C'est sec, mais ça colle !



A faire en classe ou chez soi :

Posez une pavé (bloc de bois, brique, gomme...) sur un plateau.

Inclinez progressivement le plateau jusqu'à ce que le bloc glisse.
Notez l'angle de chute ou la hauteur du haut du plateau.
Recommencez avec une autre face du bloc.

Observez que l'angle limite de décrochage dépend peu de la face en contact sur le plateau, à condition que toutes les faces de la brique ont le même état de surface..

Pour mettre la main à la pâte

13/3 De l'eau qui colle ?

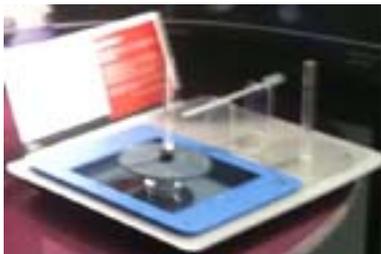
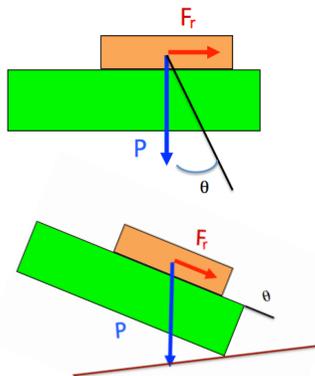


A faire en classe ou chez soi :

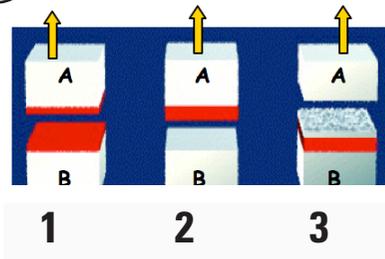
Placez une petite plaque de verre sur une support lisse et légèrement mouillé.
Essayez ensuite de la décoller. Il est plus facile de la faire glisser !

Refaites l'expérience avec une feuille de PVC.

Placez une goutte d'eau entre 2 billes, 2 balles de ping-pong ou de mousse et laissez les rouler sur une table.
Refaites l'expérience en mouillant avec votre salive.
L'effet de collage est plus efficace par suite de l'effet des molécules (mucus) que contient la salive.



1 3



Pour en savoir plus

13/1 De la colle qui colle ?

La force de collage est la limite au-delà de laquelle les blocs se séparent. Dans la **fracture cohésive** (1) la fracture se fait dans l'épaisseur du bloc de colle.

Dans la **fracture adhésive** (2), c'est à l'interface entre la colle et un des blocs que se fait la rupture. Les deux cas définissent une rupture intergranulaire.

Dans le cas limite d'une très bonne colle (3), la fracture est intragranulaire.

Les progrès dans les études sur les polymères ont permis de mettre au point de nouveaux modes de collage qui permettent des successions de collages décollages (post it) ou qui permettent de réparer des déchirures en remettant en contact les deux parties d'une pièce plastique préalablement découpées.

Le caractère dynamique des chaînes de polymères joue un rôle essentiel dans ces applications. On peut comparer ces chaînes à des plats de nouilles agitées qui font comme un laçage entre les surfaces.

Il en est de même des bonnes soudures où la soudure fondue fait un alliage avec les métaux qu'elle soude et où le décapant assure un bon état de surface préalable.

voir M&M page 247

Pour en savoir plus

13/2 C'est sec, mais ça colle !

La force maximum qui s'oppose au déplacement est proportionnelle à la force qui s'applique perpendiculairement à la paroi (cette force est le poids pour une surface horizontale).

On peut évaluer le coefficient de frottement en plaçant l'objet sur un plan incliné. Le coefficient de frottement est la tangente de l'angle maximum du plan avant que l'objet ne commence à glisser. Dans un milieu granulaire, cet angle correspond à l'angle maximum de stabilité d'un tas. (Voir 14-2)

L'adhérence permet au grimpeur de tenir sur une prise de pied par le choix judicieux de la nature du caoutchouc qui est en contact avec la roche. La force exercée perpendiculairement à la surface rugueuse de la roche par le bord de la semelle assure l'adhérence du grimpeur.

voir M&M page 70



Pour en savoir plus

13/3 De l'eau qui colle ?

Nous rencontrons deux phénomènes bien différents qui interviennent :

La capillarité : une goutte liquide posée sur une surface prend une forme de calotte sphérique qui présente un certain angle avec la surface. Cet "angle de contact" est d'autant plus faible que le liquide et le solide ont une affinité chimique élevée. C'est le cas de l'eau sur du verre. Une petite goutte placée entre deux plaques de verre les attire en utilisant la plus grande surface possible. L'attraction capillaire tend ainsi à coller nos cheveux mouillés.

La lubrification traduit l'effet du glissement d'une plaque mobile qui se déplace parallèlement à un substrat fixe grâce à la présence d'un fluide interstitiel.

Dans la lubrification, la force qui maintient la plaque est due à l'effet d'un fluide (air, eau présents entre les plaques et qui est cisailé par le mouvement relatif. Une surpression est induite par suite du déplacement).

La lubrification intervient dans de nombreux sports de glisse. Elle est responsable de la tenue de paliers hydrauliques où une pièce en rotation est maintenue à l'intérieur d'une autre pièce fixe. La légère excentricité entre les deux est la cause de la force de sustentation.



En cas de pluie, la goutte roule facilement et ne charge pas la feuille

voir Pour en savoir plus 6/1 et M&M pages 260 et 269

14

Dans les châteaux de sable, l'attraction entre les grains mouillés est créée par la tension superficielle des ponts liquides présents entre les grains. Il s'agit de la **capillarité**.

Vous faites appel à celle-ci lorsque vous mouillez votre doigt pour soulever une feuille de papier posée sur une table. L'eau s'étale entre le doigt et la feuille et les rapproche, ce qui crée une force d'attraction.

Les déformations des matériaux granulaires se font généralement par des joints qui passent entre les grains et qui constituent le maillon faible. On parle dans ce cas de mécanismes intergranulaires. C'est le cas des avalanches qui se déclenchent quand s'effondre le château de sable mais aussi de la fracture d'une barre de chocolat aux noisettes (les grains).

De même, entre les grains qui constituent une céramique se trouve une phase vitreuse qui donne la translucidité à la porcelaine et assure par ailleurs la cohésion. Cette phase se ramollit à chaud, si bien que les mécanismes d'écoulement et de rupture sont intergranulaires à haute température. C'est un problème important pour les céramiques utilisées dans les moteurs d'avion, les boucliers thermiques...

Dans les châteaux de sable, l'attraction entre les grains mouillés est créée par la tension superficielle des ponts liquides présents entre les grains. Il s'agit de la **capillarité**.

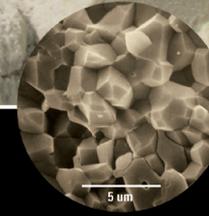
Vous faites appel à celle-ci lorsque vous mouillez votre doigt pour soulever une feuille de papier posée sur une table. L'eau s'étale entre le doigt et la feuille et les rapproche, ce qui crée une force d'attraction.

Les déformations des matériaux granulaires se font généralement par des joints qui passent entre les grains et qui constituent le maillon faible. On parle dans ce cas de mécanismes intergranulaires. C'est le cas des avalanches qui se déclenchent quand s'effondre le château de sable mais aussi de la fracture d'une barre de chocolat aux noisettes (les grains).

De même, entre les grains qui constituent une céramique se trouve une phase vitreuse qui donne la translucidité à la porcelaine et assure par ailleurs la cohésion. Cette phase se ramollit à chaud, si bien que les mécanismes d'écoulement et de rupture sont intergranulaires à haute température. C'est un problème important pour les céramiques utilisées dans les moteurs d'avion, les boucliers thermiques...

Des grains qui collent

La plupart des matériaux, comme ce château de sable, sont constitués de grains. La nature des joints entre grains détermine la cohésion de l'ensemble.



- Un pont d'eau entre deux billes ©L.Fustiere & R.Auger/CRAI/Anis-BISAG
- Croûtes de sable mouillé ©SR-La Roche/Anis
- Fracture d'une barre de chocolat aux noisettes ©MB-Obéans
- Facies de rupture intergranulaire dans une céramique ©G.G.Dinne-NIST

• Sculpteur de châteaux de sable ©SS-California



Cassé ! Recollé !!!

14/1

Certains de ces galets sont cassés en deux ou trois morceaux.

Identifiez les morceaux qui vont ensemble en les assemblant.

Vous pouvez aussi fracturer un galet en le plaçant dans une main et en le tapant avec un autre galet.

Que retenir ?

Les deux parties d'un galet cassé s'emboîtent parfaitement. Les bords nets de la fracture (les faciès de rupture) sont caractéristiques de la **rupture** d'un solide **fragile**.

Les grains qui constituent le galet s'ajustent exactement comme deux pièces d'un puzzle permettant d'assembler étroitement les deux parties.

Si on mouille les deux bords de la fracture avec de l'eau, l'adhérence est plus forte.

Ces galets, provenant d'une plage du Cap Corse, sont des roches sédimentaires constituées de grains qui se sont déposés au fond de l'eau. Au cours du temps, ils se sont progressivement agrégés puis cimentés pour former un matériau cohésif.

sur une idée d'Harold Auradou (Fast-Université d'Orsay)

Risques d'avalanches !

14/2

Inclinez le dispositif jusqu'à ce que le cylindre roule.
Repérez l'angle sur le rapporteur.

Recommencez mais arrêtez-vous juste avant d'atteindre cet angle critique.
Donnez un léger coup de pouce au cylindre pour le faire démarrer.
S'arrête-t-il en route ?

Que retenir ?

Au-delà d'un certain angle, le cylindre dévale la pente.

En-deçà de cet angle, pour que le cylindre se mette en mouvement il faut lui donner une impulsion et il s'arrête de lui-même avant d'atteindre le bas. L'angle d'arrêt est inférieur à l'angle maximum de stabilité.

Lors d'une avalanche, des couches de grains se déplacent ainsi les unes par rapport aux autres.

Ce dispositif présente les différents régimes d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison et des vitesses relatives des couches de grain. Selon les circonstances, la neige s'écoule jusqu'en bas ou s'arrête à mi-pente.

sur une idée d'Adrian Daerr (MSC-Université Paris Diderot)

Cheveux mouillés, cheveux collés !

14/3

Plongez le peigne dans le bac en appuyant sur les boules latérales,
puis remontez-le **doucement**.

Que se passe-t-il ?

Que retenir ?

Un mince film d'eau établit entre deux lamelles une sorte de pont, appelé **pont capillaire**, qui les maintient en contact. Ce type de **collage** permet l'association de microstructures selon des motifs bien définis.

Ce phénomène s'observe quotidiennement sur les cheveux. Mouillés, ils se collent les uns aux autres mais, s'ils sont totalement immergés dans l'eau, l'adhésion disparaît et ils retrouvent leur indépendance.

En effet, l'adhésion est due aux ponts capillaires dont le pouvoir d'attraction s'annule dans un milieu saturé d'eau. Ces mêmes ponts capillaires assurent la cohésion du château de sable (photo du médaillon no 1).

Ce collage par l'eau est également mis en évidence par l'expérience 13/3.

sur une idée de José Bico (ESPCI, ParisTech)



Pour mettre la main à la pâte

14/1 Cassé ! Recollé !!!



A faire en classe ou chez soi :

Refaites l'expérience de l'exposition avec des galets de plage ou de rivière ou d'un carrelage de cuisine. Pour casser un galet, placez-le dans la paume incurvée d'une de vos mains et cassez-le avec un autre galet.

Recherchez autour de vous des échantillons de roches sédimentaires et réduisez-les par grattage ou en les cassant avec un petit marteau. Observez les faces et les débris obtenus. L'utilisation d'une loupe ou d'une loupe binoculaire est souvent utile en particulier dans le cas des grès où les grains de sable ont souvent une taille de l'ordre de quelques centaines de micromètres.

Poursuivez les expériences culinaires avec une préparation où des grains sont associés à une pâte qu'on a cuit. Regardez comment, après cuisson, se brise cette préparation solide.

Vous pouvez aussi casser du chocolat aux noisettes. (La dégustation implique un nouveau mode de rupture... sauf si vous le laissez fondre dans la bouche !)

Pour mettre la main à la pâte

14/2 Risques d'avalanches !



A faire en classe ou chez soi :

Réalisez un plan rugueux (par exemple en collant un papier abrasif ou en fixant une première couche de sable sur une plaque lisse préalablement recouverte de colle).

Regardez comment une bille unique descend sur ce plan rugueux une fois incliné. La bille ne descend pas en ligne droite.

Recommencez en faisant tomber régulièrement du sable dans la partie haute du plan. (Comparez avec l'expérience proposée en 7/1)

Voir la vidéo : www.dailymotion.com/video/x19aqi9_ca-coule-du-sablier_tech



Pour mettre la main à la pâte

14/3 Cheveux mouillés, cheveux collés !



A faire en classe ou chez soi :

Faites des pâtes de sable en ajustant les paramètres suivants avant de retourner le seau :

- la taille moyenne des grains que l'on a préalablement tamisés,
- le tassement progressif des grains en cours de remplissage et avant le mouillage,
- une fois le seau rempli de sable sec, la quantité d'eau ajoutée.

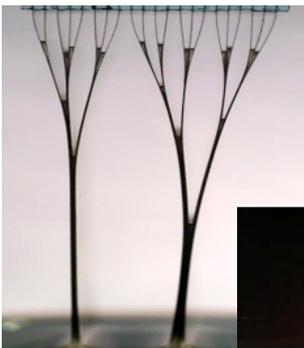
Dans les différents cas, notez la charge maximum que peut supporter le pâté.

Mettez un peu d'eau au fond d'un récipient puis faites couler lentement du sable sur cette surface et observez le comportement du tas de sable.

Placez un petit carré ou un rectangle de papier ou de rhodoïd sur une surface mouillée et observez ce qu'il se passe.

Refaites l'expérience avec un triangle de papier ou de rhodoïd.

Voir la vidéo : www.dailymotion.com/video/x19auqf_origami-capillaire_tech



14



Pour en savoir plus

14/1 Cassé ! Recollé !!!

Les roches sédimentaires se sont formées par collage très progressif de grains à partir de dépôts de minéraux qui avaient été entraînés par la circulation de l'eau. Dans la mise en forme de ces matériaux, de nouvelles surfaces actives se forment à l'interface entre les grains qui est généralement plus fragile que l'intérieur des grains.

Le grès (en anglais sandstone ou pierre de sable) est constitué de grains de silice agrégés et qui se sont cimentés en donnant un matériau cohésif et dur.

Dans les bétons, le ciment assure une liaison entre grains par la cristallisation obtenue par la réaction chimique d'hydratation. L'utilisation de mélanges choisis de grains de tailles différentes permet d'augmenter la compacité et la résistance mécanique des bétons aux efforts de compression.



Pour en savoir plus

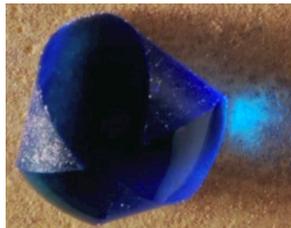
14/2 Risques d'avalanches !

Deux grains solides, pressés l'un contre l'autre, se déforment de façon élastique en diminuant leur distance (un problème étudié comme sujet de sa thèse par H. Hertz ... mieux connu par ses travaux sur les ondes électromagnétiques). Ils peuvent rouler ou glisser l'un sur l'autre si la force entre les grains est suffisante. Sinon, ils restent fixes : le tas de sable est bloqué.

On peut étudier les propriétés mécaniques d'une couche de sable en déplaçant une plaque posée sur le sable parallèlement à la couche (en cisillant la couche). Mais on constate que la résistance au cisaillement (qui serait l'équivalent de la viscosité pour un liquide dépend de la pression exercée perpendiculairement à la couche.

Il s'en passe des choses dans la zone intermédiaire entre ces deux valeurs d'angles (déjà rencontrées dans l'expérience 7/1) ! Un skieur déclenche une avalanche de neige sur une pente forte en perturbant ce fragile équilibre mécanique.

[voir M&M page 297](#)



Pour en savoir plus

14/3 Cheveux mouillés, cheveux collés !

La capillarité est la force qui maintient les grains de sable en contact dans la construction d'un château de sable dont les parois peuvent être presque verticales.

La liaison entre deux grains est due à des ponts capillaires liquides (voir 13/3). L'existence de l'air autour de ces ponts est essentielle et l'attraction de l'eau s'annule si le milieu granulaire est saturé en eau.

Si on marche sur ce château, il s'effondre en faisant glisser des couches de grains les unes le long des autres. C'est un exemple particulier de rupture intergranulaire.

Le ménisque concave qui borde le pont capillaire entre deux grains rend compte de l'existence d'une surpression de l'air s'exerçant de l'extérieur sur l'eau et qui maintient les grains en contact.

Dans de nombreuses préparations culinaires utilisant des grains (par exemple une semoule), en ajoutant un peu d'eau on crée une structure qui est cohésive mais facilement friable.

[voir M&M page 196](#)

15

Une alternance de **glissements** et de **frottements statiques** permet de rendre compte des tremblements de terre. Mais des exemples proches, plus paisibles bien que bruyants, illustrent aussi ce phénomène : le crissement de la craie qui glisse sur le tableau, le grincement d'une porte que l'on ouvre, ou, dans un registre plus harmonieux, la vibration d'une corde de violon.

Pour déplacer un meuble en le poussant, il faut exercer une force qui dépasse la limite d'adhérence : la force de **frottement dynamique**. Elle est un peu plus faible que la valeur nécessaire pour mettre le meuble en mouvement qui correspond au **coefficient de frottement statique**. Dans certaines conditions, le meuble pourra s'arrêter.

Le mouvement peut être saccadé et présenter des alternances d'arrêts et de glissements : ce cas est bien illustré par un patin posé sur un plan horizontal et tiré par un élastique ou un ressort, que l'on entraîne à vitesse constante.

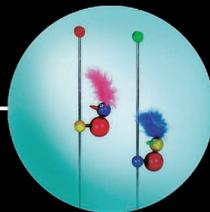
Une alternance de **glissements** et de **frottements statiques** permet de rendre compte des tremblements de terre. Mais des exemples proches, plus paisibles bien que bruyants, illustrent aussi ce phénomène : le crissement de la craie qui glisse sur le tableau, le grincement d'une porte que l'on ouvre, ou, dans un registre plus harmonieux, la vibration d'une corde de violon.

Pour déplacer un meuble en le poussant, il faut exercer une force qui dépasse la limite d'adhérence : la force de **frottement dynamique**. Elle est un peu plus faible que la valeur nécessaire pour mettre le meuble en mouvement qui correspond au **coefficient de frottement statique**. Dans certaines conditions, le meuble pourra s'arrêter.

Le mouvement peut être saccadé et présenter des alternances d'arrêts et de glissements : ce cas est bien illustré par un patin tiré par un élastique ou un ressort, que l'on entraîne à vitesse constante.

Les séismes qui se produisent de façon assez régulière ainsi que les secousses rapprochées qui les accompagnent sont dus au glissement saccadé des plaques tectoniques le long de failles.

Glisser par saccade



• Frotts sur l'air ége ©Janets-Pearty
• Achet glissant sur un violon ©Alvarez-Fotofa.com
• Tremblement de terre au Japon en 2012 ©Sinhua Shinhua/AP/Kyodo News

• Séisme sur l'île des Sœurs (Guadeloupe-2004) ©BRGM-S.Bis de Berc



Un coup à droite, un coup à gauche !

15/1

Placez vos deux index sous les deux bouts de la barre et soulevez-là.

Puis rapprochez **doucement** vos doigts.

Comment se déplacent-ils ?
Où se rejoignent-ils ?

Que retenir ?

Vos doigts glissent, s'arrêtent, repartent mais se rejoignent toujours sous le centre de gravité de la barre. C'est le milieu de la barre, si elle est homogène.

On observe fréquemment cette alternance entre phases de glissement et phases de blocage lorsque deux corps frottent l'un contre l'autre.

Ils proviennent de la différence entre l'effet du frottement sous les deux doigts qui supportent des poids différents, si ils sont à des distances différentes du centre de gravité. Au départ, aux extrémités, le glissement est dynamique, il s'effectue rapidement. Plus vous vous rapprochez du centre et plus les déplacements sont courts.

Glisser par à-coups

15/2

Faites tourner le disque **lentement**
dans le sens des flèches.

Comment se comporte le patin ?

Que retenir ?

Alors que le disque tourne à vitesse constante, le patin, tenu par un élastique, avance par à-coups. Le mécanisme de ce glissement saccadé, ou "broutage" (stick-slip), est simple : au départ, le patin adhère au disque si bien qu'il est emporté par **frottement statique**. L'élastique s'allonge alors et la force qu'il exerce sur le patin augmente progressivement.

Lorsque cette force dépasse le **seuil de glissement**, le patin n'est plus emporté par le disque, mais glisse dessus, tiré par l'élastique : le frottement devient alors dynamique. Il est inférieur au frottement statique.

Lorsque la force que l'élastique exerce sur le patin devient suffisamment faible, ce dernier adhère de nouveau au disque par frottement statique : il est emporté, et ainsi de suite.

Ce type de modélisation est une approche simplifiée d'un système de frein.

sur une idée de Jean-Christophe Géminard (ENS Lyon)

Du scotch qui broute

15/3

Détachez la bande de scotch, d'abord **lentement puis de plus en plus vite**.

Comparez les réactions à l'arrachement.

Que retenir ?

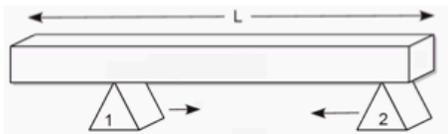
Des lignes de ruptures apparaissent sur la bande de scotch. Elles révèlent un phénomène de broutage, alternance de stick (collé) et slip (glissé).

L'énergie nécessaire pour décoller l'adhésif dépend de la vitesse du mouvement et évolue également selon le comportement de l'adhésif qui peut soit se détacher du ruban soit se détacher de la surface soit encore se séparer en deux couches.

sur une idée de Loïc Vanel (Université Lyon 1)

Pour mettre la main à la pâte

15/1 Un coup à droite, un coup à gauche



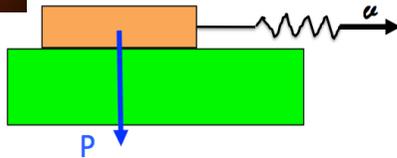
A faire en classe ou chez soi :

La même expérience peut être faite chez soi avec une barre, un manche à balai, une tige non homogène. A chaque fois vous arriverez au centre de gravité de la barre !

C'est la même chose si vous posez une feuille rigide de forme quelconque sur trois de vos doigts et les rapprochez. Ils s'arrêteront sous le centre de gravité.

Pour mettre la main à la pâte

15/2 Glisser par à-coups



A faire en classe ou chez soi :

Retrouvez le phénomène

- en tirant une gomme tirée par un élastique,
- en faisant crisser les pneus de votre vélo ou de votre voiture au freinage ou au démarrage !

Ce **frottement dynamique** entre surfaces sèches s'accompagne de phénomènes acoustiques plus ou moins plaisants : le crissement des freins à disque est dû au frottement des plaquettes de frein sur le disque ; les saccades de l'archet sur la corde du violon entretiennent ses vibrations.

Le grincement d'une porte est également produit par le frottement des gonds. Trouvez une porte qui s'ouvre en grinçant. Essayez de la réouvrir sans bruit !

Pour mettre la main à la pâte

15/3 Du scotch qui broute



A faire en classe ou chez soi :

Tirez sur une bande de scotch et observez au doigt et à l'œil comment elle se déroule par saccades. Essayez de le faire dans l'obscurité ou sous lumière Ultra Violette.

Vous pouvez aussi le faire avec deux bandes de velcro collées l'une à l'autre.

15

Pour en savoir plus

15/1 Un coup à droite, un coup à gauche

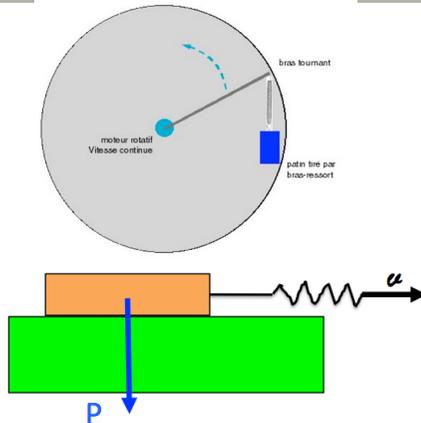
Nous savons tous combien il peut être difficile de mettre en mouvement un solide qu'on pousse et comment il peut être difficile aussi de l'arrêter une fois qu'il est en mouvement.

Le coefficient de frottement statique correspond à la valeur maximum de la force qui résiste au déplacement.

La force de frottement dynamique rend compte de la poussée que l'on doit exercer sur un solide qui glisse sur un plan horizontal à vitesse constante. Ces forces dépendent des conditions de l'interface entre ces solides comme le coefficient de **frottement statique** qui résiste au déplacement. Ces deux quantités sont proportionnelles au poids de l'objet qui se déplace.

Dans l'expérience, le doigt le plus éloigné du centre de gravité de la barre est moins chargé : il se déplace plus facilement que l'autre en se rapprochant du centre de gravité.

Au lieu de pousser un solide (un bloc parallélépipédique sur un plan horizontal), on peut le mettre sur un plan incliné avec un angle un peu plus élevé que la limite de frottement statique. En changeant l'angle, on change aussi la force qui pousse le solide. Regardez la vitesse limite en fonction de l'angle et de la rugosité de la table et du bloc.



Pour en savoir plus

15/2 Glisser par à-coups

BROUTAGE : Travail défectueux d'un outil qui mord par saccades ou mauvais enclenchement d'organes mécaniques qui doivent être mis en contact (frein, embrayage).

Le brouitage ou stick-slip (coller-glisser) est l'effet de l'alternance de phases de mouvement et de repos d'un objet en contact avec un autre et qu'on sollicite de façon continue à vitesse constante par l'intermédiaire d'un ressort.

Initialement les deux objets restent en contact (collé). Dans cette phase, l'élastique (ou le ressort) se tend continûment jusqu'à ce que la tension soit suffisante pour mettre en mouvement la pièce mobile. Cette dernière se déplace ensuite sur une certaine distance tant que la force nécessaire pour maintenir le glissement reste inférieure à la force nécessaire à la mise en mouvement.

À l'échelle planétaire, le phénomène de brouitage est responsable des tremblements de terre qui se produisent à intervalles plus ou moins réguliers à la rencontre de plaques tectoniques. Le déplacement relatif continu conduit à une accumulation de contraintes de ces plaques (jouant le rôle de l'ensemble "élastique et déplacement à vitesse constante". La libération soudaine d'énergie au-delà d'une contrainte seuil est à la base du tremblement de terre.

voir M&M page 186

Pour en savoir plus

15/3 Du scotch qui broute

Le brouitage a, en général, pour origine une compétition entre deux mécanismes de fracture différents.

A très basse vitesse, l'adhésif peut être considéré comme un fluide visqueux, la fracture est alors cohésive et se produit dans l'adhésif même.

A plus haute vitesse, l'adhésif se comporte de plus en plus comme un solide vitreux et la fracture devient adhésive (voir 13/1) : soit le ruban adhésif se décolle entièrement de la surface de plexiglas, soit l'adhésif se détache entièrement du ruban et reste sur la surface.

L'énergie nécessaire pour décoller le ruban adhésif évolue différemment avec la vitesse selon que l'adhésif reste solidaire du ruban ou se détache de celui-ci, ce qui est à l'origine de l'instabilité et des marques laissées sur le ruban.

Le bruit généré peut être intense. L'endommagement de l'adhésif réduit ses performances d'adhésion mais également ses propriétés d'étanchéité recherchées par exemple pour protéger les boîtiers de disque dur de l'infiltration de poussières. Certains scotchs broutent à très basse vitesse comme les rubans adhésifs marrons d'emballage.



16

La prise en masse, les retrait et fragmentations des sols argileux conduisent à un ensemble de fines fissures puis à des pavages souvent réguliers de mottes de terre dont l'épaisseur dépend de l'humidité.

Dans les zones urbanisées, le retrait-gonflement de ces sols argileux provoque des dommages dans les constructions qui peuvent aller jusqu'à leur destruction.

Ces phénomènes de fissuration se produisent aussi dans les peintures ou les vernis qui vieillissent et où la couche déposée, mise en tension, se craquelle.

Les spectaculaires orgues basaltiques sont dues au refroidissement lent de roches en fusion : la contraction du matériau qui se solidifie conduit à des réseaux réguliers de colonnes individuelles.

Devenez géologue en cuisine : mouillez une surface de caramel avec de l'eau glacée ou faites sécher un mélange à volume égal d'eau et de maïzena. Patientez, regardez, ça va craqueler !

La prise en masse, les retrait et fragmentations des sols argileux conduisent à un ensemble de fines fissures puis à des pavages souvent réguliers de mottes de terre dont l'épaisseur dépend de l'humidité.

Dans les zones urbanisées, le retrait-gonflement de ces sols argileux provoque des dommages dans les constructions qui peuvent aller jusqu'à leur destruction.

Ces phénomènes de fissuration se produisent aussi dans les peintures ou les vernis qui vieillissent et où la couche déposée, mise en tension, se craquelle.

Les spectaculaires orgues basaltiques sont dues au refroidissement lent de roches en fusion : la contraction du matériau qui se solidifie conduit à des réseaux réguliers de colonnes individuelles.

Devenez géologue en cuisine : mouillez une surface de caramel avec de l'eau glacée ou faites sécher un mélange à volume égal d'eau et de maïzena. Patientez, regardez, ça va craqueler !

Les sols argileux mouillés se dégonflent en période de sécheresse en formant des réseaux de fissures.

Sécher et fissurer



• Orgues basaltiques en Islande ©BRGM - J.P. Girard
• Réseaux de craquelures - La Jacotte ©ICRBMF-E. Lambert
• Vase craquelé ©M&M - Venissat sur Canson

• Sol argileux desséché ©Chen Edt/Imaginechina



Fera-t-il beau demain ?

Observez ces deux pommes de pin.

L'une est fermée, l'autre ouverte.

Comment expliquer ce phénomène ?

16/1

Que retenir ?

Humide, la pomme de pin se ferme, sèche, elle s'ouvre. Les écailles se courbent au gré des fluctuations d'humidité, faisant de la pomme de pin un hygromètre rudimentaire.

Les écailles sont essentiellement constituées de deux couches de tissus gonflant différemment au contact de l'eau. L'un des bois se dilatant plus que l'autre, l'écaille se courbe.



Deux lames métalliques accolées qui se dilatent de façon inégale constituent un bilame. Il sert de capteur de température pour interrupteurs, disjoncteurs, thermostats.

sur une idée d'Etienne Reyssat (ESPCI-ParisTech)

Peintures et vernis craquelés

Observez à l'œil nu puis avec la loupe chacune de ces surfaces.

Comparez les craquelures de chacune.

16/2

Que retenir ?

Les craquelures d'un tableau, comme des empreintes digitales, permettent d'authentifier une œuvre, de découvrir les techniques employées par l'artiste... et d'affiner les méthodes de restauration.

Au cours du séchage ou du refroidissement, les vernis, émaux et peintures sont mis en tension. Ils se déforment sous l'effet d'importantes contraintes de rétraction ainsi que de transformations physico-chimiques.

Un grand nombre de processus font apparaître craquelures, décollement, plis, cloques...



Sur l'assiette, les craquelures sont plus resserrées sur les bords qu'au centre. Cela traduit l'inégalité de la couche d'émail qui apparaît aussi dans la variation de la couleur du revêtement.

sur une idée de Ludovic Pauchard et Véronique Lazarus (Fast-Université d'Orsay)
assiette craquelée réalisée par Mathilde Reyssat (ESPCI-Paris)

Craquante argile !

Observez ces deux surfaces argileuses.

Comment expliquer ces différences ?

16/3

Que retenir ?

Les craquelures forment un réseau dont les différentes lignes se croisent à peu près à angle droit. Au voisinage d'une première fracture, les suivantes se propagent en minimisant les contraintes, conduisant à des raccordement à angle droit.



Si la couche est épaisse et que le séchage se poursuit, les fractures se développent en profondeur. Elles s'auto-organisent à nouveau en minimisant l'énergie et forment cette fois un réseau hexagonal dont les rameaux se raccordent à 120 degrés.

sur une idée de Véronique Lazarus et Ludovic Pauchard (FAST-Université d'Orsay)



Pour mettre la main à la pâte

16/1 Fera-t-il beau demain ?



A faire en classe ou chez soi :

Fabriquez des structures en bilame en collant une bande de papier sur un morceau de plastique de taille similaire. Ces objets répondent à l'humidité en se courbant. Vous pourrez ainsi fabriquer un hygromètre en collant par leur extrémité deux lames de bois très fines (bois de placage) de même taille mais faites avec des bois différents (par ex. thuya et frêne).

Déposez une bande de papier calque sur un bain d'eau.

La face inférieure se mouille et gonfle en premier, provoquant l'enroulement de la feuille sur elle-même.

Quand le papier est mouillé entièrement, il se déroule. Choisissez des morceaux de tailles, d'épaisseurs, de formes différentes.

Vous pouvez aussi essayer de faire l'expérience des pommes de pin trempées dans de l'eau.



Pour mettre la main à la pâte

16/2 Peintures et vernis craquelés



A faire en classe ou chez soi :

Fabriquez du caramel et faites le durcir dans une assiette.

Faites ensuite couler de l'eau glacée dessus et observez la surface.

=> www.fast.u-psud.fr/~pauchard/presentation/crack_cargese.pdf

Vous pouvez aussi mettre une boue argileuse à peine liquide dans une assiette et laisser sécher à l'air plusieurs jours.



Pour mettre la main à la pâte

16/3 Craquante argile !



A faire en classe ou chez soi :

Formez une suspension en mélangeant environ 100 g de maïzena avec la même masse d'eau.

Rajoutez un peu d'eau de javel.

Déposez-en une fine couche (de l'ordre d'un millimètre) dans un verre, vous observerez des raccords à 90 degrés.

Faites sécher la suspension restante dans un autre verre.

Au bout de quelques jours (5 à 20 selon les conditions atmosphériques), vous obtiendrez en surface des fissures désordonnées qui s'auto-organisent pour former des colonnes maïzeniques analogues à leur équivalent basaltique.

=> www.lgoehring.com/Starch_columns.html

16



Pour en savoir plus

16/1 Fera-t-il beau demain ?

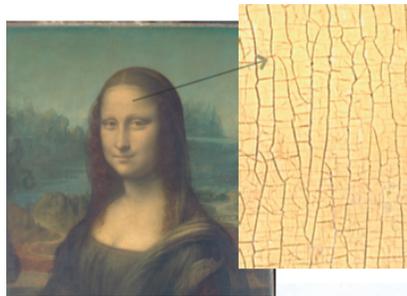
On trouve couramment des disjoncteurs thermiques dont l'élément actif (le bilame) est constitué de deux bandes de métal soudées à plat sur toute leur surface.

Lorsque la température varie, les deux métaux se dilatent différemment, provoquant des tensions dans les matériaux, et causent la courbure du bilame, qui permet alors de couper un circuit électrique.

La structure élancée amplifie les mouvements : plus le bilame est mince et long, plus la déflexion de son extrémité est grande pour une variation de température donnée, ce qui permet par exemple de fabriquer des microcapteurs ou actionneurs très sensibles, transformant l'énergie thermique en mouvement mécanique.

Le principe du bilame permet de détecter facilement des variations d'autres paramètres physiques ou chimiques. Ainsi, la pomme de pin est un bilame hygrosensible.

Voir la vidéo : www.youtube.com/watch?v=kCKmX-XG9R0



Pour en savoir plus

16/2 Peintures et vernis craquelés

Véritables empreintes digitales du tableau, les craquelures permettent d'authentifier une peinture. On peut également y retrouver l'origine de l'œuvre, les méthodes employées par l'artiste, sa réalisation et même le support sur lequel il a été réalisé, toile, nature du bois... et affiner les méthodes de restauration.

Le séchage de suspensions colloïdales constitue un modèle pour étudier scientifiquement ces phénomènes.

Pour quantifier la formation des contraintes, on peut déposer la suspension sur une lame métallique flexible. En séchant, un champ de contraintes mécaniques se développe, ce qui provoque la déformation de lame. Des fractures apparaissent dans la couche de gel et la lame redevient plate (délamination).



Une fracture est la réponse d'un solide à un champ de contrainte mécanique qui peut être soit appliqué de l'extérieur, soit généré de manière interne. Ainsi, lorsque les tensions mécaniques au sein d'un solide deviennent suffisamment importantes, des fractures se forment et relaxent au moins une partie de ces tensions.

voir M&M page 227



Pour en savoir plus

16/3 Craquante argile !

Lorsque une suspension (mélange liquide/grains solides) sèche, le solvant s'évapore et les particules se rapprochent pour former un solide qui se craquelle en se rétractant au cours du temps. C'est le cas du sol argileux asséché suffisamment de temps après avoir été noyé dans l'eau.

En couche mince, la rétraction est frustrée par le substrat plus rigide. Des contraintes de tension se développent qui conduisent si elles sont suffisamment importantes à la formation successive de fissures se propageant horizontalement et venant se connecter à peu près à angle droit à des fissures préexistantes.

En couche épaisse, la rétraction se propage en profondeur.

Les fissures apparaissent d'abord en surface puis se propagent verticalement en suivant le front de séchage. Les fissures ont le "temps" de s'auto-organiser pour atteindre un nouvel état de minimum énergétique.

Un phénomène analogue apparaît quand on provoque la rétraction d'une couche de solide par refroidissement. Exemples : quand on refroidit le vernis des assiettes après leur fabrication, quand une coulée de lave refroidit.



Présentations indépendantes

- m1 - Une expo sous contraintes !**
- m2 - L'art sous contrainte !**
- m3 - Efficaces, les pare-chocs**
- m4 - Arbres en tension**
- m5 - Plaques tectoniques**
- m6 - Plis et drappés**
- m7 - Des plis indéplissables**
- m8 - Du verre incassable !**
- m9 - Goutte ... à ... goutte !!**
- m10 - En forme, la raquette !**



Expo sous contraintes !

m/1

Le mobilier de cette exposition a été conçu de manière à illustrer les différents thèmes abordés par les expériences :

Les matériaux roulent des mécaniques !

Que retenir ?

Les plateaux des tables présentent une structure en nids d'abeilles décalés formés d'une plaque thermoplastique pliée et assemblée de manière à former des alvéoles hexagonales.

Cette structure légère et résistante est insérée entre deux plaques colorées de polycarbonate (PMMA : polyméthacrylate de méthyle). Les plateaux sont ensuite découpés au laser.

Les plateaux des petites tables, comme celle-ci, reposent sur un piétement tridimensionnel auto tendu illustrant la tenségrité (voir table 4).

Les panneaux en PVC (polychlorure de vinyle) sur lesquels est collée une série d'images ont été précontraints de manière à prendre la même forme de vague que les tables.

Les supports des expériences et les panneaux protégeant les modes d'emploi, comme celui-ci, sont constitués de plaques de PVC pliées et moulées à chaud.

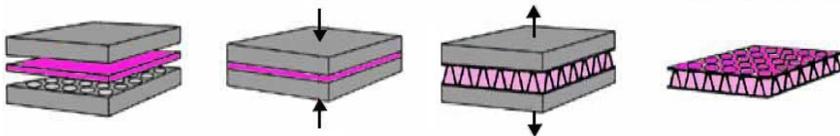
plateaux de table "clear-PEP" ©CP Concept-Auterive (31)
façonnage des matériaux : BCF-Jouy-le-Pothier (45)



Pour en savoir plus m1 Expo sous contraintes !

D'autres types de contraintes apparaissent en fonction des lieux où l'exposition est présentée !
 En province ou à l'étranger, l'exposition accueille de 100 à 300 visiteurs par jour.
 Dans les grands musées des capitales, elle peut accueillir jusqu'à 1000 visiteurs/jour.

Apparaissent alors des contraintes de gestion du matériel mais aussi de sécurité.
 Le public se doit de respecter le matériel et les matériaux mis à sa disposition, des règles d'hygiène s'imposent, l'eau ne doit pas être touchée, les matériaux ne doivent se volatiliser...



L'art sous contrainte !

m/2

Cette mousse écrasée s'inspire d'une œuvre de l'artiste Edmond Vernassa.
Elle illustre comment la matière réagit à des sollicitations.

Que retenir ?

L'artiste niçois Edmond Vernassa, récemment disparu, s'est intéressé aux réactions de matériaux soumis à des sollicitations diverses. Son travail montre comment plis, déchirures, écrasements sont les réponses de la matière aux contraintes.

Christo et Jeanne Claude, un couple d'artistes, ont empaqueté monuments et ponts que leurs travaux éphémères « révèlent en [les] cachant » dans les replis de toiles immenses.

Toutes ces recherches ont été menées en étroite liaison avec des scientifiques. Nombres de toiles et sculptures témoignent de l'habileté des artistes à rendre plis et drapés.

pour en savoir plus, voir la table 3

Efficaces, les pare-chocs !

m/3

Observez comment ce tube d'aluminium a absorbé les chocs.



Que retenir ?

Si on écrase ce tube progressivement, seule la partie inférieure est d'abord affectée, l'autre extrémité restant intacte. Contrairement à un poteau soumis à une compression parallèle à son axe longitudinal, ce tube cylindrique ne flambe pas, il s'écrase. Comme un pare-chocs idéal, il absorbe l'énergie produite par la contrainte de compression.

Choisir judicieusement la structure et la nature des pare-chocs d'une automobile permet de contrôler la déformation de celle-ci sous l'effet d'un choc et même d'empêcher que l'habitacle soit touché par le processus. Adapté à la partie avant d'une automobile, ce principe peut protéger efficacement les passagers lors d'une collision (voir la table n°3).

**Idée et objet fournis par Laurent Rota
Mécanique des Structures et Matériaux
PSA Peugeot Citroën**

=> www.dailymotion.com/video/x19aov7_attention-au-choc_tech%20

Arbres en tensions

m/4

Observez ces tranches de bois.

Pourquoi l'une est fendue et l'autre pas ?

Pourquoi les cernes de l'une sont centrés et l'autre pas ?

Au cours du séchage, la tranche mince s'est gondolée d'une élégante façon et, dans le même temps, ne s'est pas fendue.

On pourra comparer au résultat de l'expérience (12/3).

Que retenir ?

Les cernes rendent compte de la croissance irrégulière de l'arbre qui est plus importante dans quand les conditions climatiques sont favorables. L'irrégularité de l'espacement des cernes permet de suivre les variations annuelles du climat.

Dans le cas de la tranche fendue, la croissance est dissymétrique par suite de sollicitations transverses (telles que l'effet de vents dominants). Les cernes sont plus serrés du côté où l'arbre est comprimé.

Dans un arbre, les couches périphériques sont en tension et compriment le cœur de l'arbre. De nombreuses tiges végétales doivent leur rigidité à l'existence de ces zones externes tendues et comprimées. Une fois coupées, elles libèrent cette tension et se fendent (ou fléchissent, comme la rhubarbe. (Voir 4/2).

Une autre solution est le gondollement : le séchage permet d'augmenter la longueur du périmètre tout en conservant la distance au centre. C'est un effet du même type que ce qui se passe avec des sacs plastiques utilisés pour le transport et que l'on déchire. La fissure crée un étirement qui fait gondoler le bord.

**Tranche de chêne fournie par l'INRA d'Orléans
Tranche de chêne rouvre réalisée par Pascal Oudet, artiste et tourneur sur bois à Goncelin (Isère)**



Pour en savoir plus m2 Arts sous contrainte !

A la différence d'une tige pressée entre deux extrémités qui se courbe progressivement et de façon réversible quand on la comprime (c'est le flambage classique), une boîte cylindrique (comme une boîte boisson) résiste à la compression jusqu'à une valeur de seuil où elle s'écrase d'un seul coup.



On peut reproduire cette expérience, déjà proposée en 3-2, de la façon suivante :

on met les deux pieds en douceur sur deux boîtes boisson identiques vides.

Généralement les boîtes garderont leur forme cylindrique (la forme de la boîte l'a rigidifiée).

Si un complice fait alors une pichenette simultanée sur le côté de chaque boîte elles s'écrasent brutalement.

Ce qui prouve la métastabilité de l'équilibre initial et le rôle des défauts.

Attention, il faut se tenir avec les mains posées de côté lorsque vous vous placez sur les boîtes et éviter que votre complice ne subisse un écrasement... avec celui de la boîte !

Pour en savoir plus m3 Efficaces, les pare-chocs !

Dans le domaine de la sécurité automobile, le processus de déformation progressive est utilisé pour absorber l'énergie du choc : l'enjeu pour l'ingénieur est de concevoir une structure qui reste stable (les plis sont ici bien réguliers !) et dont la géométrie spécifiquement optimisée permet d'obtenir un effort d'écrasement stable tout au long du processus.

Toute la subtilité réside dans le design de la section :

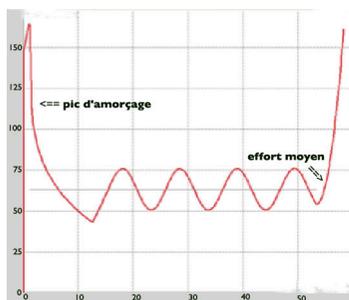
- il faut assurer la stabilité globale de la structure et ne pas avoir un flambement global : les efforts ne sont jamais en réalité exactement dans l'axe de la structure absorbante,

- il faut bien maîtriser le flambement local qui permettra de se déformer progressivement ; une amorce est généralement utilisée sur l'extrémité de la structure pour favoriser le mode de flambage local et la formation des plis progressifs.

On obtient une courbe d'effort en fonction de l'écrasement typique qui présente un plateau d'effort et des variations correspondant à chaque formation de pli ; la figure ci-contre montre un cas idéalisé, sans amorce de flambage. On observe dans ce cas un "pic d'amorçage" très élevé dont on parvient à réduire l'amplitude de façon contrôlée grâce à l'amorce pratiquée.

A la fin du processus, lorsque tout le tube a été déformé, il se trouve compacté et l'effort croit alors très rapidement (fin de la courbe). Le film présente un essai de compression où l'on voit une importante masse animée d'une vitesse constante sur laquelle est rigidement fixée l'éprouvette. L'ensemble est projeté sur un mur rigide (équipé de cellules d'effort). Quelques ordres de grandeur :

- vitesse d'impact voisine de 50km/h
- durée du choc de quelques centièmes de seconde
- effort développé de l'ordre de 10 à 15 tonnes
- décélération de l'ordre de 50 à 100 fois la pesanteur
- Faites vous-même l'expérience avec des boîtes de conserve ou de boisson gazeuses (vides !) et en tapant dessus avec un maillet.



Pour en savoir plus m4 Arbres en tension

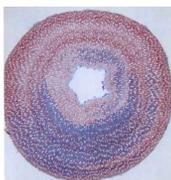
Les cernes qui permettent de marquer l'âge de l'arbre (la dendrochronologie) se forment au cours de l'année et en particulier au printemps et pendant l'été, quand les conditions climatiques sont favorables. Leur espacement irrégulier permet de suivre les irrégularités climatiques au fil des années. De plus lorsqu'un arbre fléchit sous l'effet de son poids, ou pour des causes externes (vents dominants), la croissance des cellules végétales des couches périphériques est modifiée. Elle est contrainte du côté comprimé (on parle de bois de compression). Sur la phase opposée, on peut avoir du bois de tension, qui lui aussi va après sa formation définitive conduire à maintenir l'orientation du bois.

Les couches périphériques vivantes de l'arbre sont sous tension et compriment les couches internes (le bois à proprement parler). La rigidité de l'arbre tient à cet équilibre en tenségrité (voir expérience 4/3).

La tranche épaisse de bois se fend pour libérer ces contraintes. Cet effet tend à disparaître pour des bûches anciennes car le bois perd cette rigidité. Dans la lame mince, le bois que l'on a laissé sécher lentement se gondole pour permettre à la périphérie d'occuper un plus grand périmètre. Les fibres axiales sont mises en tension et contrôlent la façon dont se gondole la feuille.



Retrouvez dans les coupes de bois des forêts, des coupes qui montrent des cœurs décentrés qui indiquent d'où viennent les vents dominants.



Tectoniques !

m/5

Observez avec quelle lenteur s'écoule ce matériau à forte viscosité. Il permet de simuler, en laboratoire, le déplacement des plaques tectoniques constituant l'écorce terrestre.



Que retenir ?

Cette plaque de silicone se déplace lentement, comme le font les plaques tectoniques de l'écorce terrestre.

La formation d'une chaîne de montagnes débute par la fermeture d'un domaine océanique. Le continent chevauchant est le siège d'un important volcanisme et subit le plus souvent un régime tectonique en compression conduisant à l'épaississement de la croûte et à la formation de reliefs de type chaîne andine, avec failles, chevauchements et plissements.

Une fois l'océan entièrement disparu, la marge continentale entre en subduction sous le continent épaissi. Ce mouvement ne peut durer très longtemps car le contraste de densité entre la croûte et le manteau s'oppose à cette subduction.

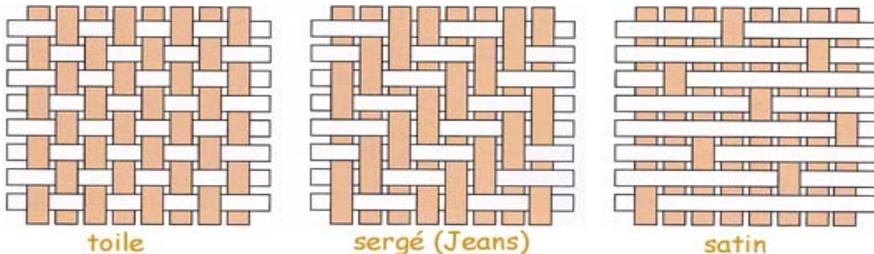
sur une idée de Jean-Pierre Brun (Géosciences - Université Rennes 1)

Plis et drapés

m/6

Essayez d'ajuster chacun de ces tissus à la sphère.

Y en a-t-il un qui s'applique sans former de plis ?



toile

sergé (Jeans)

satin

Que retenir ?

Ces trois tissus présentent trois armures différentes, c'est-à-dire trois manières d'entrecroiser les fils de chaîne et de trame, la **toile**, le **sergé** et le **satin**.

La toile se déforme peu parce que les fils de chaîne et de trame passant alternativement les uns sous les autres forment un réseau dense d'entrecroisements.

L'armure sergée est plus souple car le croisement des fils est décalé à chaque rang et que tous les fils ne se croisent pas. L'armure satin produit des tissus très souples grâce aux fils non tissés, les flottés, de trame et de chaîne.

La feuille de papier, elle, est indéformable et de ce fait il est impossible d'en recouvrir une sphère. En revanche, on peut enrober étroitement une sphère dans une membrane élastique de latex ou de caoutchouc.

Comme l'a montré le mathématicien K. F. Gauss (1777-1855) (cf panneau 11), c'est un problème de courbure. C'est la raison pour laquelle les cartes planes ne traduisent qu'imparfaitement la réalité de la géographie de notre globe terrestre !

Des plis indéplissables

m/7

Pli plat, creux, soleil, accordéon, ... ou pli fleur, paon ...

Essayez d'identifier chacun de ces plissés.

Que retenir ?

Plier ou encore froisser une feuille de papier ou un tissu revient à leur appliquer des contraintes mécaniques très fortes et localisées. Des déformations irréversibles dues à l'endommagement du matériau apparaissent, appelées « phénomène de plasticité ». Ces zones singulières, les plis, adoptent alors un comportement mécanique nouveau, réagissant à la manière d'une charnière dont la constante d'élasticité sera déduite des déformations plastiques subies.

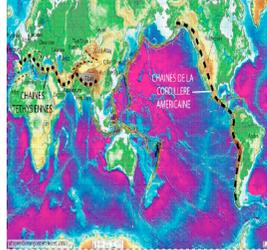
Ce nouveau type de « matériau » obtenu en pliant des structures minces peut être utilisé pour créer des structures adaptatives telles que des voiles ou antennes solaires déployables, des éléments architecturaux, mais aussi de nouvelles textures de tissus utilisées pour la haute couture et obtenus par des plissages originaux, comme l'échantillon montré ici.

Tissus plissés par l'Atelier « L'indéplissable » de Gérard Lognon – Paris avec le concours de Benjamin Thiria (ESPCI-ParisTech)

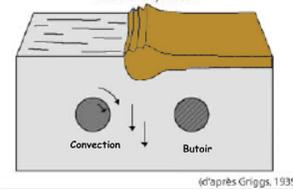


Pour en savoir plus m5 Déplacements des plaques tectoniques !

Le Poly-Di-Méthyl-Siloxane, en abrégé PDMS, est un polymère très utilisé pour la fabrication de puces en microfluidique. C'est un polymère organo-minéral (une structure contenant du carbone et du silicium) de la famille des siloxanes (mot dérivé de silicium, oxygène et alkane). En dehors de la microfluidique, il est utilisé comme additif alimentaire (E900), dans les shampoings, comme anti-moussant dans les boissons ou dans les huiles lubrifiantes.



=> www.dailymotion.com/video/x19asbo_chaine-de-montagne-en-formation_tech%20



Pour en savoir plus m6 Plis et drappés

Dans un tissu, le glissement des fils de chaîne et de trame les uns par rapport aux autres permettent de courber les tissus d'autant plus que ces croisements sont moins denses (dans le satin par rapport à la toile). Une feuille de papier peut être facilement appliquée sur un cône ou un cylindre. On peut aussi lui imposer des plis qui permettent de la rendre plus compacte sans que cela n'introduise des défauts permanents dans le matériau. C'est tout différent si on veut l'appliquer sur une sphère où il est nécessaire de l'étirer pour l'appliquer précisément.

De façon générale on peut déformer une surface en la courbant et sans avoir à l'étirer si on conserve une certaine courbure dite gaussienne (qui est nulle pour une feuille de papier plan). Cette courbure est le produit des deux courbures principales. On peut estimer cette courbure en traçant un triangle sur cette surface (la somme des angles d'un triangle tracé sur la surface donne la courbure qui est nulle si cette somme est de 360 degrés).

voir M&M page 180



Ouvrez les garde-robes de votre maison et regardez comment se déforment les différents tissus suivant leur texture. Retrouvez la toile, le sergé, le satin...



Pour en savoir plus m7 Plis indéplissables

Chez les maîtres plisseurs comme ici chez Gérard Lognon à Paris, chaque moule de pli en carton, appelé "métier", porte un nom : plat, creux, soleil, accordéon, ... ou fleur, paon ou encore plus précis comme le célèbre carré plissé Hermès. L'atelier dispose de 3 000 moules ou métiers de plis réalisés depuis 3 générations.

Le métier à plisser est constitué de deux feuilles de carton Kraft qui s'emboîtent parfaitement. Il est déroulé sur une table puis ouvert pour séparer les deux feuilles de carton. Le tissu est, ensuite, étalé méticuleusement sur le métier. Intervient alors la phase délicate où les deux plisseurs, positionnés en bout de table, forment à la main les plis au fur et à mesure en les rapprochant vers eux. L'ensemble est, ensuite, passé à l'étuve à 100°C, ce qui permet de « marquer » les plis de façon irréversible. Le tissu est alors prêt à être utilisé pour les créations des grands couturiers. Pour garder son élasticité d'origine, le tissu plissé doit être conservé au sec et à température ambiante pour éviter aux plis de se ramollir.

Les structures pliées répondent à une contrainte extérieure selon deux modes élastiques découplés, le premier dépendant des caractéristiques élastiques intrinsèques du matériau, le module d'Young, le second du niveau des plis, caractérisé par les déformations plastiques.



Ouvrez les garde-robes de votre maison et regardez les différents plis des chemises, jupes, robes et pantalons, des plus simples aux plus complexes !

Du verre incassable !

m/8

Marchez sur la vitre, sans sauter !

Quel que soit votre poids, elle ne devrait pas casser !

Que retenir ?

Le verre a une résistance aux chocs très limitée.

Il peut être rendu très résistant par trempe thermique en le passant dans un four pour qu'il atteigne une température proche de son point de ramollissement (entre 550 et 700 °C) et en refroidissant rapidement la surface (en soufflant de l'air froid). Le refroidissement - et donc la contraction - du cœur qui survient plus tard met alors les surfaces en compression.

Cette trempe met les couches extérieures en compression. Ce type de verre est couramment utilisé dans l'automobile, sous le nom de « verre sécurité ».

Le verre trempé thermiquement ne peut plus être recoupé, façonné ou percé. Il est donc important que l'usinage et la mise aux dimensions définitives se fassent avant la trempe.

vitre latérale de voiture Skoda fournie par Saint-Gobain Recherche

Goutte... à... goutte !!

m/9

Observez comment s'écoule le bitume à la sortie de l'entonnoir.

Quand pensez-vous que la prochaine goutte de bitume tombera ?

Que retenir ?

Le bitume est un matériau viscoélastique, tantôt solide tantôt liquide, et thermo-susceptible, son comportement dépend de la température (voir table 9). Dans des conditions normales de température, le bitume s'écoule sous l'effet de son propre poids.

Placé dans un entonnoir, le bitume s'écoule très lentement, goutte à goutte. La vitesse de l'écoulement dépend bien sûr de la température ambiante et de la nature du bitume.

Toujours en cours à l'université de Brisbane, l'expérience reproduite ici, dite de la goutte de poix, a démarré en 1927. Elle doit démontrer que certaines substances d'apparence solide sont en réalité des fluides de très haute viscosité. Considérée comme la plus longue de l'histoire des sciences (Livre Guinness des records), elle a reçu le prix Ig Nobel de physique en 2005. Huit gouttes seulement sont déjà tombées, la dernière en 2000 !

sur une idée de Ferhat Hammoum (IFSTTAR-Département Matériaux - Nantes-Bouguenais)

En forme, la raquette !

m/10

Faites coulisser la partie grise. Cela change-t-il la forme de la raquette ?

Vous pouvez vérifier votre réponse en comparant les formes obtenues à celle dessinée sur le mur.



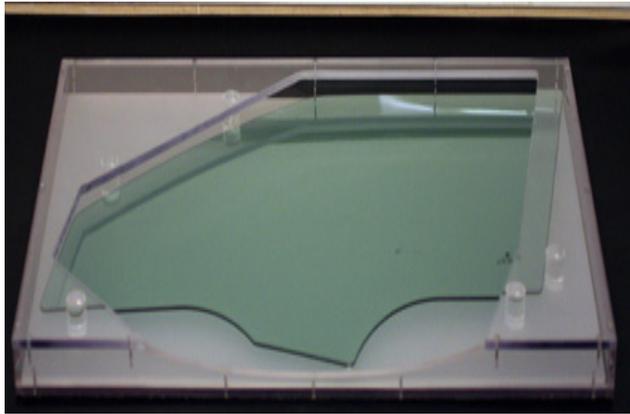
Que retenir ?

Bien que sa taille change, la raquette conserve sa forme. Quel que soit le matériau utilisé pour la fabriquer, sa forme restera toujours identique ! Et toutes les raquettes construites sur ce modèle réagiront de même.

Cette forme résulte d'une compétition entre les forces qui rapprochent les extrémités de la bande (en bas) et les contraintes intérieures, qui s'opposent à la courbure de la bande (concentrées notamment au sommet de la raquette).

Dans une raquette de jeu d'enfants où le grillage est un élément de la raquette, le fait de casser des brins du grillage n'entraîne pas un gauchissement de la raquette.

sur une idée de José Bico & Benoît Roman (ESPCI-ParisTech)



Pour en savoir plus m8 Du verre incassable !

Un verre trempé thermiquement est chauffé aux environ de 700 °C, température à laquelle les molécules commencent à être suffisamment mobiles (voir expérience 5/1), puis refroidit brutalement à l'aide de jets d'air comprimé. Un vitrage trempé de 8 mm résiste à la chute d'une bille en acier de 500 g tombant d'une hauteur de 2 m alors qu'une hauteur de 30 cm suffirait pour briser un verre non trempé. Un verre trempé résiste également à un choc thermique de 200 °C. Un « verre sécurité » qui se brise, se fragmente en mille morceaux comme un verre Duralex !

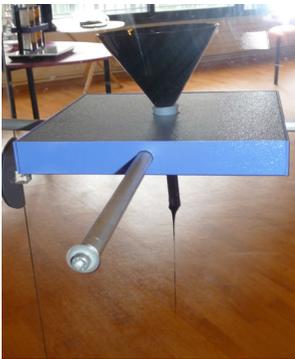
La surface se rigidifie en premier, puis le cœur. La trempe crée des tensions permanentes dans l'épaisseur du verre. Les couches de tension externes permettent de compenser, par flexions, les tensions inverses subies par un choc. Si le choc atteint les régions internes du verre, les contraintes se libèrent et le verre éclate.

Il est difficile de tremper efficacement un verre de moins de 3 mm d'épaisseur.

Au 17ème siècle, les premiers verres trempés s'illustraient de manière spectaculaire sous forme de gouttes de verre refroidies dans l'eau. Ces « larmes bataviennes » résistent à de violents coups de marteau alors qu'une simple cassure de l'extrémité de la larme la fait exploser en fine poudre. La technique industrielle fut brevetée en 1874 par François Royer de la Bastie.



Vérifiez quels sont les verres trempés dans votre voisinage immédiat ! Sans essayer de les briser, vous pouvez les examiner entre deux feuilles polaroids croisées. Les verres trempés ont des contraintes internes et montrent des couleurs !



Pour en savoir plus m9 Goutte ... à ... goutte !!

Le bitume présent dans cette expérience est un produit issu du pétrole et constitue la fraction de distillation la plus lourde du pétrole. Il possède des propriétés

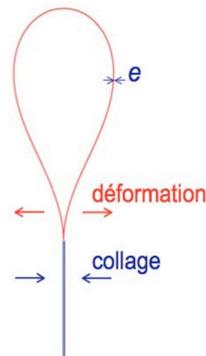
d'une grande complexité à la fois sur le plan de sa composition chimique et de sa réponse aux sollicitations mécanique et thermique. Une telle expérience a été mise en place en 1927 par le Professeur Thomas Parnell de l'Université de Brisbane, en Australie.

Cette expérience sert à démontrer aux étudiants de l'université que certains matériaux réputés comme des solides se comportent véritablement comme des fluides avec une viscosité très élevée.

Commencée en 1927 par le Professeur Thomas Parnell (1881-1948), cette expérience a reçu le prix Ig Nobel de physique en 2005. Elle illustre la relative « fluidité » d'un matériau et elle est toujours en cours à l'université de Brisbane.

L'utilisation du bitume remonte à la préhistoire et les plus anciens objets humains contenant du bitume connus à ce jour sont vraisemblablement vieux de 180 000 ans [Connan, 1999]. En parallèle d'applications médicales, le bitume naturel a ainsi été employé généralement comme adhésif, en particulier pour le génie civil, dans des mortiers ou en tant qu'agent d'imperméabilisation [Abraham, 1960], [Connan, 1999]. La Bible cite aussi des exemples d'utilisations, pour l'arche de Noé ou le berceau de Moïse.

Il faut cependant remonter à Nabopolassar, roi de Babylone (625-604 av. J.-C.) pour trouver les premières mentions de l'utilisation de bitume pour application routière [Abraham, 1960], mais cet usage a disparu pour ne réapparaître qu'au cours du 19ème siècle et finalement évoluer vers nos techniques routières actuelles.



Pour en savoir plus m10 En forme, la raquette !

On observe ici un exemple d'interaction entre l'élasticité qui résiste à la déformation et le mécanisme de collage des deux extrémités (effet de la tension superficielle ou d'un adhésif) : une surface mouillée, une gouttelette d'eau ou une bulle de savon peuvent-elles déformer une feuille élastique plane ? Oui si les forces capillaires d'adhésion surpassent celles de la rigidité de la feuille. Si la feuille est moins flexible, les bords commencent à fléchir et la bande se ré-ouvre.

Dans ces interactions entre élasticité et tension superficielle, beaucoup de questions demeurent toujours ouvertes : quelle est la dynamique de collage des structures flexibles ? Comment prédire quelle sera la forme finale à partir d'un "patron" donné ?

Ces phénomènes originaux d'élasto-capillarité sont particulièrement intéressants dans les microsystèmes, les nanostructures et ouvrent des pistes pour fabriquer des micro objets...



Déposez un film d'eau sur une bande étroite ou un carré de 10x10 cm de papier sulfurisé et observez son comportement !



Toucher, casser, couler

Les matériaux roulent des mécaniques

Glossaire

Table 13

Tables 1 - 4 - 8 - 11

Tables 1 - 2 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 12 - 14

Tables 2 - 3 - 13 - 15

Table 7

Adhésion : phénomène physico-chimique qui se produit lorsque l'on met en contact deux matériaux. Elle est la source d'une résistance mécanique s'opposant à la séparation. On parle d'**adhérence** pour décrire la force de résistance d'un solide qu'on veut faire glisser au dessus d'un autre.

Contrainte : rapport d'une force à l'aire de la surface droite (projetée) où elle est appliquée. $\sigma = F/S$. Celle-ci peut s'exercer perpendiculairement à la surface (contrainte normale) ou à angle droit de celle ci (contrainte de cisaillement). La contrainte s'exprime en pascal (Pa).

Déformation : la déformation est une grandeur sans dimension qui permet de comparer l'état déformé à l'état initial. Ce peut être le rapport de la variation de longueur à la longueur initiale d'une structure (exemple : $\epsilon = (L-L_0)/L_0$ (allongement relatif)), ou la valeur de la variation d'angle en radians dans le cas d'une distorsion angulaire.

Déplacement : lorsqu'un matériau, solide ou liquide, est soumis à une sollicitation mécanique, toute particule de matière qui le constitue se déplace par rapport à sa position d'origine, au repos. Le déplacement est décrit par un vecteur déplacement, fonction des coordonnées de la particule. C'est la seule quantité directement accessible expérimentalement dans un problème de mécanique.

Dislocation : défaut local d'empilement des atomes d'un cristal. Les arrangements de tels défauts conduisent à la formation de lignes de joints séparant des des plus petits cristaux de matière ou «grains» séparés entre eux par des «joints de grains». On les rencontre dans de nombreuses structures présentant des empilements ordonnés (de billes, de grains de colloïdes ou d'atomes).

Tables 5 - 6

Ductilité : contraire de fragilité. Aptitude à la déformation et à la mise en forme par écoulement (plasticité et viscosité). L'étain (ou le plomb) est ductile à l'ambiante. On peut plier une feuille et courber un fil de ce métal sans qu'ils se rompent.

Fléchissez une fine lamelle de métal et de ciment. Le métal a un comportement ductile, et se déforme plastiquement, tandis que le ciment, de comportement fragile, se rompt sans se déformer plastiquement.

Tables 1 - 5 - 9

Dur / mou : décrivent l'aptitude d'un matériau à résister ou non à la pénétration d'un corps étranger (indenteur).

Essayez d'enfoncer un doigt dans le matériau.

Plus l'empreinte qui se forme est grande plus le matériau est mou (plus elle est petite plus il est dur).

Tables 1 - 6 - 9

Elasticité : comportement mécanique suivant lequel la déformation est parfaitement réversible (lorsque la charge est supprimée) et proportionnelle à la charge imposée.

Emboutissage : procédé de mise en forme par déformation plastique, le plus souvent à partir de tôle, la forme finale étant déterminée par le poinçon et la matrice.

Fatigue : la fatigue désigne l'ensemble des processus apparaissant sous sollicitation répétée (chargement cyclique) et modifiant les propriétés locales d'un matériau par la formation de fissures (ou de cavités) susceptibles d'entraîner la rupture de la structure.

Table 2

Fluage : évolution de la géométrie d'une structure sous charge constante. Phénomène d'autant plus rapide que la température est élevée.

Tables 1 - 3 - 4 - 13 - 14 - 15

Force : on n'en connaît pas l'origine, on n'en perçoit que les effets. «La nature de cette modification singulière en vertu de laquelle un corps est transporté d'un lieu dans un autre, est et sera toujours inconnue ; on l'a désignée sous le nom de force ; on ne peut déterminer que ses effets et les lois de son action» (Laplace, 1749-1827).

La force est généralement représentée par un vecteur pour donner son sens et sa direction (au sens mathématique du terme), et elle est donnée en newtons (N).

Table 7

Forgeage : procédé de mise en forme par déformation plastique, par chocs ou par pression, avec ou sans matrice, afin de contraindre une barre de métal (le plus souvent) à épouser une forme voulue.

Tables 6 - 8 - 10

Fragilité : mauvaise résistance au choc et absence de déformation permanente à la rupture (on peut recoller les morceaux d'un vase en porcelaine brisé !).

Tables 13 - 15

Frottement : interactions qui s'opposent à un mouvement relatif persistant entre deux systèmes en contact. La science du frottement est **la tribologie**.

Tables 13 - 14 - 16

Mécanique : la mécanique est la science du mouvement des systèmes matériels et de leurs déformations, en relation avec les forces qui sont à la source de ce mouvement ou de ces déformations.

Tables 1 - 3 - 5 - 7

Plasticité : comportement mécanique suivant lequel la déformation devient irréversible au-dessus d'un seuil critique de chargement, appelé seuil de plasticité.

Déformez un élastique et un trombone.

L'élastique se déforme... élastiquement, alors que le trombone se déforme plastiquement.

Table 8

Tables 6 - 7 - 9 - 11 - 12

Tables 1 - 2 - 3 - 4 - 15

Table 8

Table 4

Tables 5 - 6

Tables 5 - 6

Résilience (cf Ténacité) : capacité d'un matériau à résister au choc.

Résistance : La résistance est la valeur limite de la contrainte que peut supporter une structure, au-dessus de laquelle il y a rupture. On la rencontre en construction mécanique ou dans l'étude des fibres.

Rigide / souple : adjectifs décrivant la résistance qu'oppose ou pas un matériau à se déformer élastiquement sous charge.

Tirez sur un élastique et sur un fil métallique de diamètres comparables.

L'élastique, matériau souple, se déforme beaucoup. Le fil, matériau rigide, se déforme peu.

Ténacité : la ténacité est la valeur critique d'un facteur d'intensité des contraintes (facteur qui caractérise la résistance du matériau à la propagation de fissures) au voisinage d'un défaut (entaille, inclusion, microfissure etc.) ou d'un front de fissure à laquelle la fissuration progresse rapidement, entraînant la rupture catastrophique dans la plupart des cas. La ténacité est une mesure de la fragilité des matériaux qui s'exprime en $\text{Pa}\cdot\sqrt{\text{m}}$.

Faites une entaille dans un morceau de carrelage, et le soumettre à de la flexion. Il se rompt facilement.

La même expérience sur un morceau de bois montre un comportement différent.

Vieillessement : phénomène d'évolution (affaiblissement) au cours du temps des propriétés d'un matériau conduisant à l'altération de la tenue mécanique en service et pouvant entraîner la ruine.

Viscosité (coefficient de...) : coefficient traduisant la relation de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de **distorsion angulaire** résultante pour un liquide (loi de la viscosité linéaire ou newtonienne). La viscosité est une caractéristique du matériau.

Viscoélasticité : décrit le comportement mécanique d'un corps qui peut se rapprocher d'un liquide visqueux ou d'un solide élastique suivant les conditions de la sollicitation.

La **rhéologie** est la science des écoulements de la matière.

E. Guyon (dir) : **Matière et matériaux ; de quoi est fait le monde** (Belin 2011)
*L'ouvrage contient de nombreuses descriptions relatives à l'ensemble de l'exposition.
Les références sont données dans le texte sous la forme M& M page x*

P. Atkins : **Molécules au quotidien** (Interéditions 1989)

P.G. de Gennes : **Les objets fragiles** (Plon ,1994)

M. Eberhart : **Why things break** (Harmony books 2003)

L. Fontaine et R. Anger : **Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture** (Belin-CSI 2009)

D. François, A. Pineau et A. Zaoui : **Comportement mécanique des matériaux**, vol. 1 (éd. Hermès 1991).

D. Guitard : **Mécanique du matériau bois et composites**, (éd. Cepadues, Toulouse 1987).

J.E. Gordon : **Structures et Matériaux, l'explication mécanique des formes** (Belin 1994)

E. Guyon, J.P. Hulin, L. Petit : **Ce que disent les fluides** (Belin 2005)

J.B. Leblond : **Mécanique de la rupture fragile et ductile**, ed. Hermès 2003.

H.C. Nataf & J. Sommeria : **La physique et la terre** (Belin 2000)

L. Pauchard, V. Lazarus, B. Abou, K. Sekimoto, G. Aitken & C. Lahanier : **Craquelures dans les couches picturales des peintures d'art**
Reflats de la Physique, n°3, p5-9 (2007) (<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00158845>).

G. Petitet & M. Barquins : **Matériaux caoutchouteux** (PPUP 2008)

J.P. Poirier : **Le minéral et le vivant** (Fayard 1995)

Y. Quéré : **Physique des matériaux** (Ellipses 1998)

T. Rouxel : **Propriétés mécaniques**, ch. 1, Traité MIM sur les propriétés et les applications des céramiques,
série Alliages Métalliques (éd. Hermes, 2001)

T. Rouxel : **Fragilité des matériaux : causes et remèdes**, Reflets de la Physique (anc. Bull. de la SFP), n°8 p5-9 (2008).

Ecrit : www.palais-decouverte.fr/index.php?id=2291 "Ruptures, les matériaux roulent des mécaniques" Revue n° 386 - Mai 2013

Audio : www.franceinter.fr/emission-la-tete-au-carre-le-comportement-des-materiaux (25 février 2013)

- conférences du 13 avril 2013 au Palais de la découverte (Corps sous contraintes) : <http://www.palais-decouverte.fr/index.php?id=2312>

Vidéo : Séminaire EIST 2013 avec Etienne Guyon, José Bico, Etienne Reyssat et Benjamin Thiria (Espci) - durée 1h11

www.fondation-lamap.org/fr/page/19652/seminaire-eist-2013-conference-detienne-guyon-jose-bico-etienne-reyssat-et-benjamin

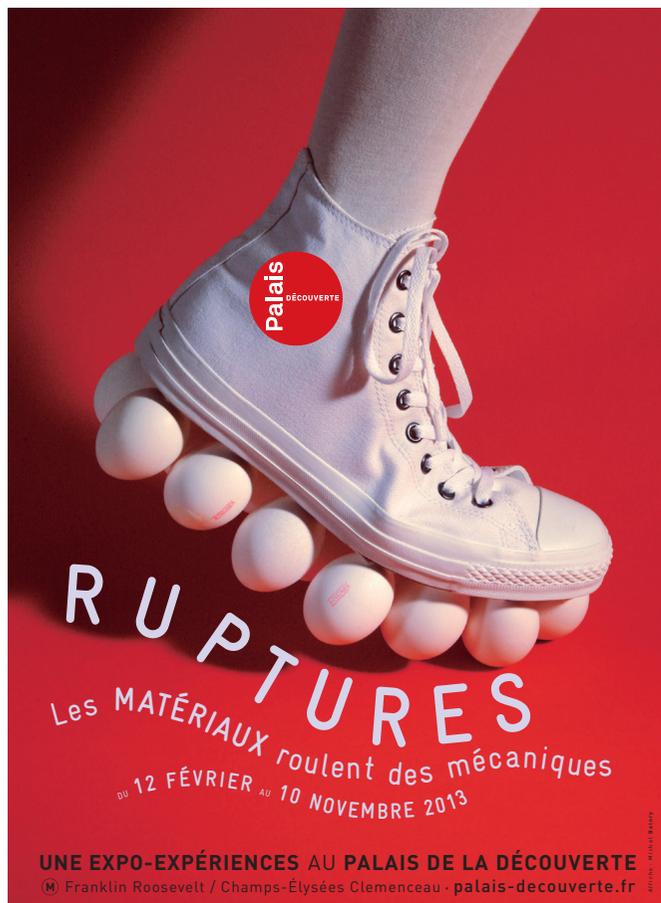
Présentation de l'expo à BFM.TV : www.wat.tv/video/sorties-jour-emmanuel-sidot-684h5_5gkv9_.html

6 vidéos réalisées dans le cadre d'Universcience "1 chercheur - 1 manip" : www.universcience.tv/rechercher-ruptures.html#

- **Imagerie acoustique d'une fissure**
- **Les formes des fissures**
- **Les bilames : un effet versatile**
- **Viscoélasticité : déformation à volonté !**
- **Stick-Slip : l'effet collé-glissé**
- **117 kg sur un oeuf !**

Bibliographie

**et, depuis les premières présentations
de l'exposition :**



Exposition déjà présentée

**au Muséum d'Orléans
septembre 2012 - janvier 2013**

**au Palais de la Découverte
février à novembre 2013
sous le titre « Ruptures »**

**à Polytech'Orléans
janvier - février 2014**

**à Polytech' Tours
septembre - octobre 2014**

**à l'Université de Montpellier
janvier - février 2015**

