

La structure du globe et son exploration

A. La Terre dans l'Univers

B. La structure du globe et son exploration

C. Tectonique des plaques

D. Histoire de la Terre

I. **La pesanteur et la forme de la Terre**

II. **Comportement mécanique des roches terrestres**

III. **Sismologie**

IV. **Schéma récapitulatif général : le fonctionnement global de la Terre**

La structure du globe et son exploration

1

La structure du globe et son exploration

I. La pesanteur et la forme de la Terre

1. La forme de la Terre

- Introduction : La Terre selon les anciens, Erastostène
- l'ellipsoïde : calculs de Newton et Clairault, vérif. expérimentale (géodésie)
- le géoïde.

2. La pesanteur

- la valeur théorique de g
- anomalies de Bouguer
- relations entre les anomalies de Bouguer, la forme du géoïde, et l'épaisseur de la croûte légère

3. La notion d'isostasie

- Le principe de l'isostasie et sa justification théorique
- Conséquences géologiques de l'isostasie :
 - érosion, sédimentation et subsidence
 - Le rebond isostatique post-glaciaire

La structure du globe et son exploration

2

La structure du globe et son exploration

II. Comportement mécanique des roches terrestres

1. Rupture fragile

- Description du processus de rupture fragile, notion de seuil de rupture
- Influence de la pression sur le seuil de rupture

2. Fluage ductile

- Notion de viscosité
- Viscosité des roches terrestres, influence de la pression et de la température

La structure du globe et son exploration

3

La structure du globe et son exploration

III. Sismologie

1. Les tremblements de Terre

- Les failles et le cycle sismique
- L'énergie libérée lors d'un séisme : la magnitude

2. Les ondes sismiques

- Les différents types d'ondes
- La propagation des ondes : lois de Descartes. Ondes réfléchies, transmises, réfractées

3. L'intérieur de la Terre vu par la sismologie

- La zone d'ombre : observation et interprétation
- L'interface croûte-manteau : la discontinuité de Mohorovicic (Moho)
 - Mise en évidence du Moho
 - Géométrie du Moho sous les continents et les océans, confirmation des données gravimétriques

La structure du globe et son exploration

4

La structure du globe et son exploration

IV. Schéma récapitulatif général : le fonctionnement global de la Terre

1. Différenciation chimique de la Terre : croûte, manteau, noyau

2. La chaleur terrestre

- Origine de la chaleur terrestre
- Propagation de la chaleur dans la Terre : la conduction et la convection
- Profil de température dans la Terre

3. Comportement mécanique et dynamique de la Terre

- Lithosphère
- Asthénosphère et mésosphère
- La couche D" et les points chauds
- Le noyau externe et le noyau interne (la graine)

La structure du globe et son exploration

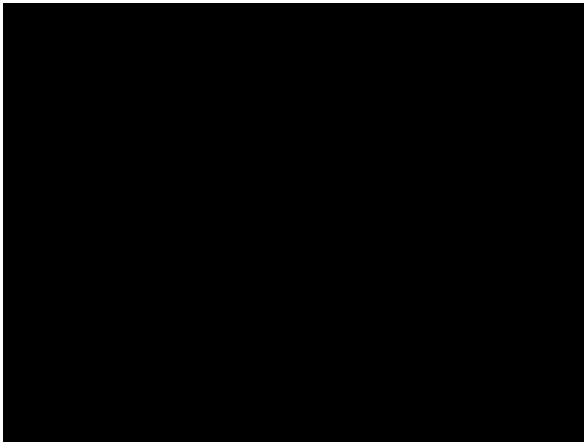
5

La forme de la Terre

éclipse de la lune du 9 Novembre 2003



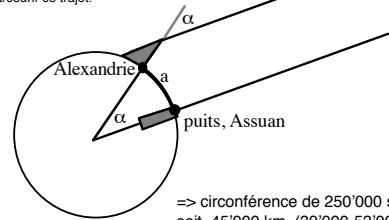
le mouvement de la lune à travers l'ombre de la terre



La forme de la Terre : ERATOSTENE DE CYRENE

ERATOSTENE (en 250 avant J.C.) :

le jour du solstice d'été, lorsque le Soleil est au zénith (lorsqu'il éclaire le fond d'un puits) à Syène (Assouan), Eratostène mesure l'ombre d'un obélisque à Alexandrie. Il détermine donc que le Soleil se trouve à 7°12' au sud de la verticale du lieu. Aussi, il estime la distance entre Assouan et Alexandrie en sachant qu'une caravane à chameau met 50 jours pour parcourir ce trajet.

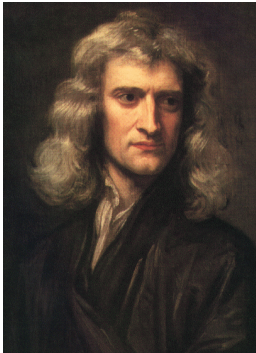


=> circonférence de 250'000 stades
soit 45'000 km (39'000-53'000 km)

La structure du globe et son exploration

8

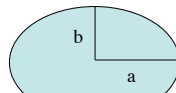
La forme de la Terre : Newton



Isaac Newton 1642 - 1727

théorie de l'attraction universelle

calcule l'aplatissement de la terre en supposant qu'elle est homogène et qu'elle a été fluide à un moment de son histoire.



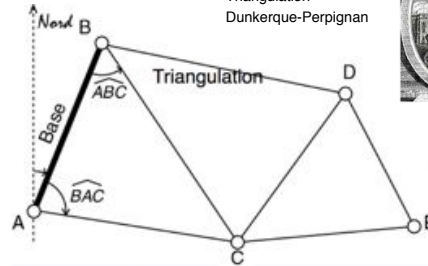
$$(a - b)/a \approx 1/230$$

La structure du globe et son exploration

9

La forme de la Terre : "les Français"

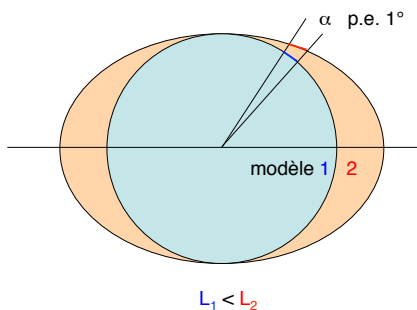
J. D. Cassini
(1652-1712)
Triangulation
Dunkerque-Perpignan



La structure du globe et son exploration

10

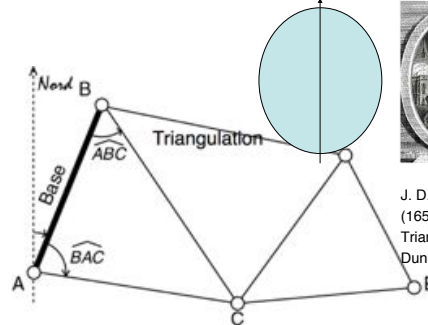
La forme de la Terre : mesurer l'aplatissement



La structure du globe et son exploration

11

La forme de la Terre : "les Français"

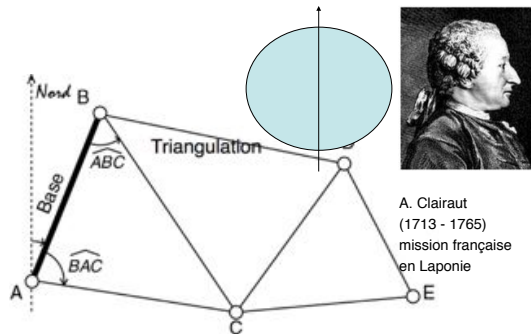


J. D. Cassini
(1652-1712)
Triangulation
Dunkerque-Perpignan

La structure du globe et son exploration

12

La forme de la Terre : "les Français"



A. Clairaut
(1713 - 1765)
mission française
en Laponie

La structure du globe et son exploration

13

La forme de la Terre : France - Angleterre : 0 - 1



Newton vs. Cassini

- England (Newton) Oblate Spheroid
- France (Cassini) Prolate Spheroid
- Lapland Peru Surveys (French Project)
 - Finland and Ecuador
 - 1735- 1743
- England Wins
- Spheroid is Oblate

La structure du globe et son exploration

14

La forme de la Terre : La pesanteur

Définition : Résultante de toutes les forces qui s'exercent sur un corps au repos à la surface de la terre.

2 termes principaux : **Gravité et Force centrifuge**.

Gravité (attraction Newtonienne ou universelle) :

Force d'attraction qui s'exerce entre la masse de la terre (M) et la masse (m) :

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2} \vec{u} \quad \text{dépend de la répartition des masses à l'intérieur du globe}$$

G : Constante gravitationnelle ($6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$)

$\vec{u}$: vecteur unitaire qui donne la direction de $\vec{F}$ (centre de grav./ Terre).

r : rayon de la Terre.

accélération gravitationnelle $\vec{f}$

$$\vec{f} = \vec{F}/m = \vec{u} GM/r^2$$

La structure du globe et son exploration

15

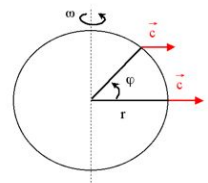
La forme de la Terre : la rotation de la terre

Force d'inertie centrifuge due à la rotation de la Terre

ω : vitesse de rotation angulaire

φ : latitude

$\vec{v}$: vecteur unitaire donnant la direction de $\vec{c}$



$$\text{Force centrifuge } \vec{c} = \omega^2 r \cos \varphi m \vec{v}$$

$\vec{c}$ dépend de la latitude : maximale à l'équateur, nulle aux pôles.

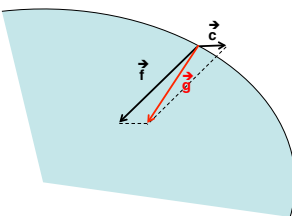
$$\text{accélération centrifuge } \vec{c} = \omega^2 r \cos \varphi \vec{v}$$

La structure du globe et son exploration

16

La forme de la Terre : accélération de la pesanteur $\vec{g}$

$$\vec{g} = \vec{f} + \vec{c}$$



g représente la verticale locale

Unité : m/s^2 (S.I.) ou gal (C.G.S.) 1 gal = 1 cm/s^2

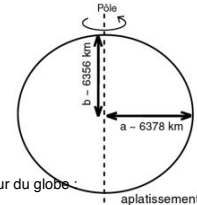
valeur moyenne de g à la surface de la Terre: 981 gal.

La structure du globe et son exploration

17

La forme de la Terre : L'ellipsoïde

Surface en tout point perpendiculaire à la pesanteur calculée.



Données :

- aplatissement = 1/290

- rotation uniforme

- répartition des masses à l'intérieur du globe

- densité totale de la Terre = 5,5

- densité des roches de surface = 2,7

→ la Terre est formée d'une croûte légère qui « flotte » sur du matériel dense

→ variation radiale de la densité

→ distribution homogène des masses

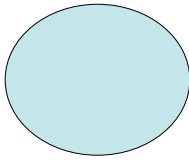
La structure du globe et son exploration

18

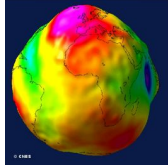
L'ellipsoïde : comparaison avec la pesanteur mesurée.....

Caractéristiques de l'ellipsoïde:

- c'est une équipotentielle de pesanteur (en tout point horizontale)
- c'est la forme gravimétrique *théorique* de la Terre en supposant une répartition homogène des masses.



théorie
ellipsoïde



mesure
géοïde

Le géοïde

Mesure de la direction de la pesanteur (fil à plomb)

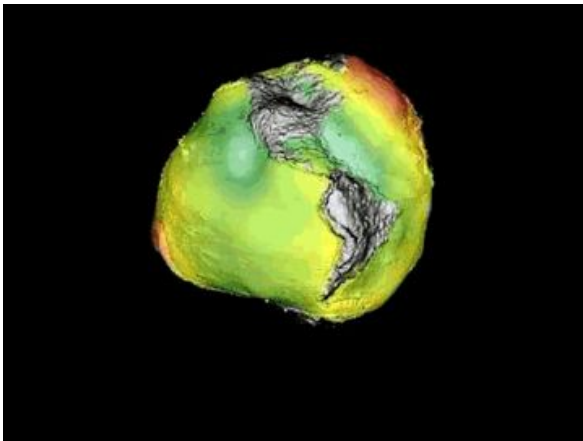
Direction du fil à plomb = verticale réelle locale

Toute surface perpendiculaire à la direction du fil à plomb
= horizontale réelle locale
= équipotentielle de pesanteur

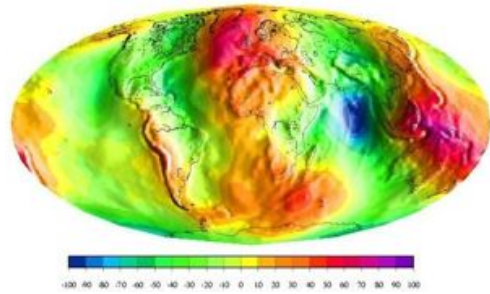
Géοïde = équipotentielle de pesanteur qui passe par le niveau moyen des océans.

Caractéristiques du géοïde:

- c'est une équipotentielle de pesanteur (en tout point horizontale)
- c'est la forme gravimétrique *réelle* de la Terre qui tient compte de la vraie répartition des masses.



Hauteurs de géοïde en m par rapport à un ellipsoïde de référence



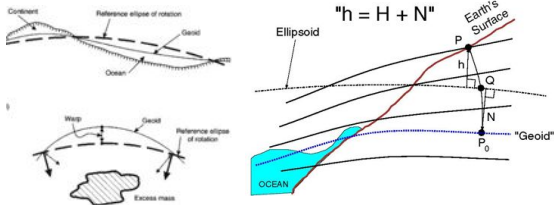
Hauteur de géοïde

Le géοïde peut être donné en unité de potentiel

$$V = GM/R \text{ [m}^2 \text{ s}^{-2}\text{]}$$

ou en altitude, cad en divisant le potentiel par le champ moyen g pour obtenir une unité en mètres $H = V/\langle g \rangle$.

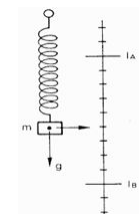
$$h = H + N$$



La gravimétrie



Le gravimètre est une sorte de balance ultra précise



Anomalies / Corrections

Anomalie = différences entre valeurs mesurées et théoriques

correction latitudinale :
a) aplatissement b) rotation ($\Rightarrow$ ellipsoïde)

réduction à l'air libre :
effet d'altitude (supposant aucune masse au-dessus du géoïde)

correction de plateau :
attraction du plateau égal à l'altitude du point de mesure au-dessus du géoïde

correction topographique :
effet du relief (déviation de la verticale).

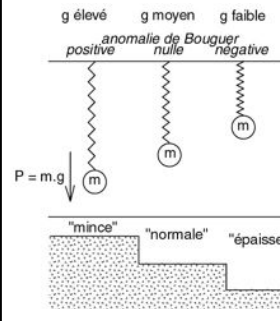
attraction lune et soleil (T)

Anomalie résiduelle $\Rightarrow$ Anomalie de Bouguer

La structure du globe et son exploration

25

Anomalies de Bouguer, géoïde et épaisseur de la croûte



Anomalies de Bouguer

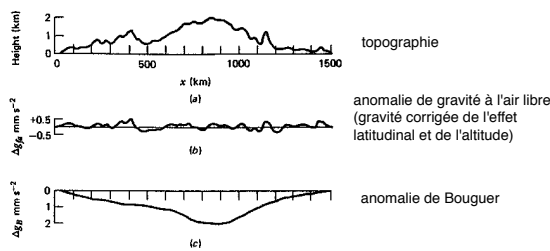
- positives,
- négatives ou
- nulles.

On assimile l'anomalie à l'étirement d'un ressort auquel est suspendu une masse m

La structure du globe et son exploration

26

Anomalies de Bouguer

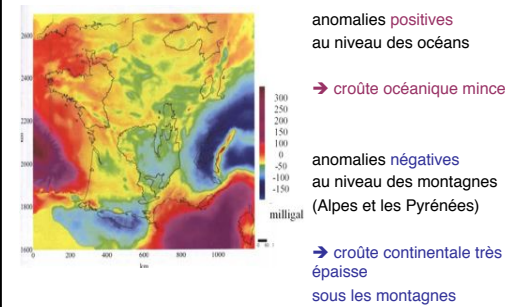


L'anomalie de Bouguer est anti-corrélée avec la topographie : mise en évidence du phénomène de compensation : il y a en profondeur une anomalie de densité opposée à celle en surface. cette anomalie profonde joue le rôle d'un "flotteur" qui va maintenir à la surface l'excès de masse généré par la topographie.

La structure du globe et son exploration

27

Anomalies de Bouguer en France



anomalies positives au niveau des océans

$\rightarrow$ croûte océanique mince

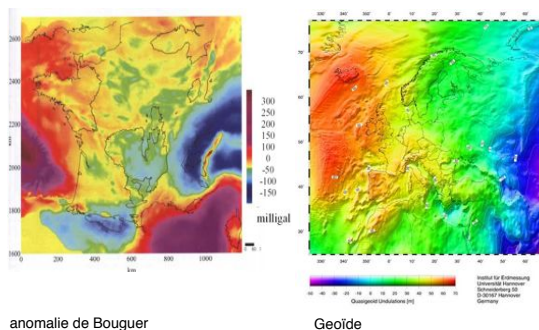
anomalies négatives au niveau des montagnes (Alpes et les Pyrénées)

$\rightarrow$ croûte continentale très épaisse sous les montagnes

La structure du globe et son exploration

28

Anomalies de Bouguer en France



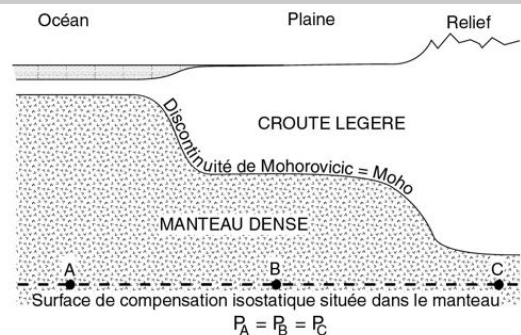
anomalie de Bouguer

Géoïde

La structure du globe et son exploration

29

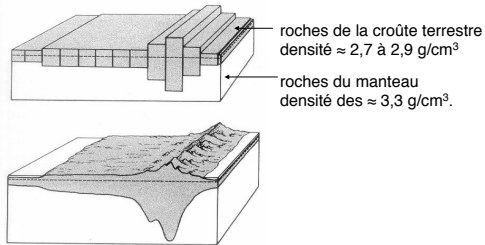
Isostasie



La structure du globe et son exploration

30

Isostasie



principe de l'isostasie : la masse d'une chaîne de montagne est compensée par une racine de roches de faible densité située sous la montagne

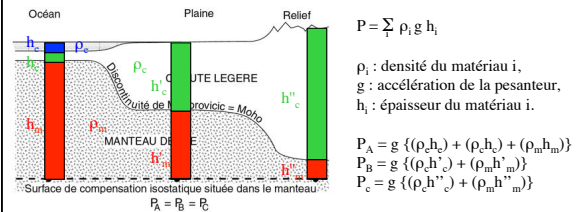
Les observations sismologiques confirment cette hypothèse.

La structure du globe et son exploration

31

Isostasie

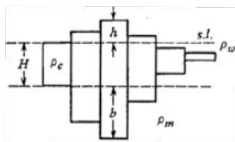
On définit l'isostasie comme un état d'équilibre réalisé à une profondeur dite profondeur ou niveau de compensation pour laquelle, la pression de charge est la même en tout point.



La structure du globe et son exploration

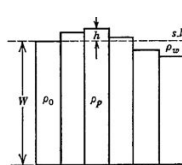
32

modèles de compensation



modèle d'Airy :
la masse volumique de la croûte est constante - les reliefs sont compensés par des racines

adapté à la lithosphère continentale



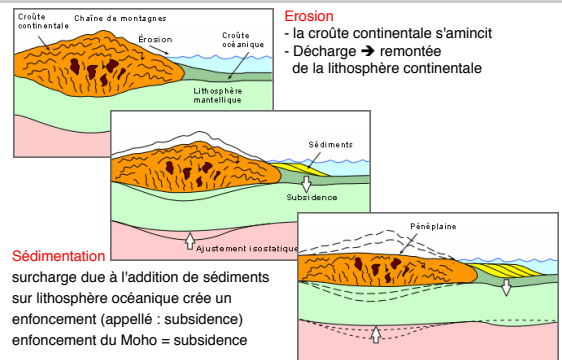
modèle de Pratt :
les variations d'altitude sont compensées par des variations de masses volumiques

adapté à la lithosphère océanique

La structure du globe et son exploration

33

Conséquences géologiques de l'isostasie



La structure du globe et son exploration

34

Le rebond isostatique post-glaciaire



e.g. Scandinavie

recouverte, il y a moins de 15000 ans, par une épaisse calotte glaciaire de 2 à 3 km.

fin de la dernière glaciation brutale => calotte glaciaire fond il y a 10000 ans

isostasie => remontée de la croûte

remontée rapide par rapport aux échelles de temps géologiques.

90% des déplacements verticaux ont déjà été effectués

Scandinavie continue de se soulever à 1cm/an (fond du Golfe de Botnie)

La structure du globe et son exploration

35

Comportement mécanique des roches



Pilier soutenant la voûte d'une carrière souterraine

La structure du globe et son exploration

36

Comportement mécanique des roches

géoïde $\approx$ ellipsoïde de révolution

cad : les observations suggèrent que la Terre se comporte "globalement" comme un fluide

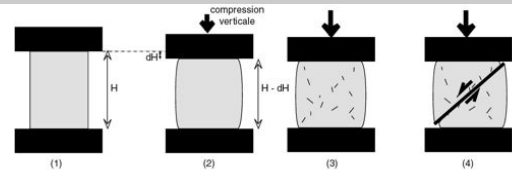
les montagnes se comportent comme des morceaux de croûte épaisse qui flottent sur des roches plus profondes

étudier comment se déforment les roches !

La structure du globe et son exploration

37

Comportement mécanique des roches : La rupture fragile



Expérience de compression uniaxiale d'une roche fragile

- (1) Eprouvette de roche au repos de hauteur H
- (2) Sous l'effet de la compression, la roche commence à se déformer de manière élastique. Elle se tasse d'une hauteur dH , et de l'énergie élastique est stockée dans l'éprouvette
- (3) La compression augmente, des microfissures apparaissent dans la roche. Il y a endommagement
- (4) Une faille apparaît. C'est la rupture fragile, l'énergie élastique est libérée

Roches fragiles (cassantes) = roches compétentes
Typique des roches de la surface de la Terre

La structure du globe et son exploration

38

Comportement mécanique des roches : La rupture fragile



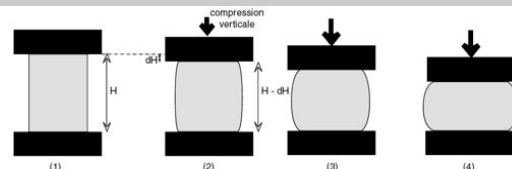
Capteur de déplacement vertical pour annoncer la rupture d'un pilier

rupture d'un pilier

La structure du globe et son exploration

39

Comportement mécanique des roches : Le fluage ductile



Expérience de compression uniaxiale d'une roche ductile

- (1) Eprouvette de roche au repos de hauteur H
- (2) Sous l'effet de la compression, la roche commence à se déformer de manière élastique. Elle se tasse d'une hauteur dH , et de l'énergie élastique est stockée dans l'éprouvette
- (3) et (4) La roche peut continuer à s'aplatir sans que des fractures n'apparaissent : c'est le phénomène de fluage ductile.

1,2 : Déformation réversible : comportement élastique (stockage d'énergie élastique)

3,4 : Déformation irréversible : comportement plastique → **Seuil de rupture jamais atteint**

La structure du globe et son exploration

40

Comportement mécanique des roches : Le fluage ductile



notion de viscosité

La structure du globe et son exploration

41

Comportement mécanique des roches

Le degré de compétence d'une roche dépend de :

- la **nature** et la texture de la roche,
- la teneur en **eau** de la roche,
- la **durée** de la contrainte,
- la **température** : quand elle augmente, la **viscosité** diminue
→ comportement plastique/ductile favorisé,
- la **pression** : quand elle augmente, le seuil de rupture est difficile à atteindre
→ roches moins compétentes

La structure du globe et son exploration

42

Viscosité

fluage ductile : déformation irréversible

$(dH/H)/dt$ vitesse de déformation

σ_1 contrainte exercée par la presse
 σ_3 pression de confinement

η viscosité

matériau visqueux Newtonien :
vitesse de déformation est proportionnelle à la contrainte

$\sigma_1 - \sigma_3 = \eta (dH/H)/dt$

Les **contraintes** (ou pressions) s'expriment en **Pa** (=N/m²),
la **viscosité** s'exprime en **Pa.s**

Plus une roche est visqueuse, plus elle se déforme difficilement.

La structure du globe et son exploration 43

Viscosité : exemples

Eau à 20°C	0,001 Pa.s
Huile d'olive à 20 °C	0,1 Pa.s
Miel d'acacia liquide à 20 °C	100 Pa.s
Silicone	10 ⁵ Pa.s
Glace	10 ¹⁵ Pa.s
Halite à 20 °C :	10 ²¹ Pa.s (glaciers de sel p.e. en Iran)
Manteau supérieur	10 ¹⁸ à 10 ²⁰ Pa.s
Manteau inférieur	10 ²¹ Pa.s
Roches de la lithosphère	jusqu'à 10 ²⁴ Pa.s

La structure du globe et son exploration 44

domaines de déformation - réversible / irréversible

Vers l'intérieur du globe, T et P augmentent :
→ matériaux de moins en moins visqueux,
→ comportement de plus en plus plastique/ductile.

La structure du globe et son exploration 45

domaines de déformation - réversible / irréversible

Vers l'intérieur du globe, **P et T** augmentent :
→ matériaux de moins en moins visqueux,
→ comportement de plus en plus plastique/ductile à des contraintes $\sigma_D = \sigma_1 - \sigma_3$ peu élevées
(quartz devient "mou" entre 300°-500°)

La structure du globe et son exploration 46

domaines de déformation - réversible / irréversible

Domaines élastiques

La structure du globe et son exploration 47