Université Paris 7

Module de Panorama des Sciences de la Terre I

TD 5 : La collision continentale

Une collision continentale conduit à l'épaississement de la croûte continentale. On notera par ρ_c et ρ_m les densités de la croûte continentale et du manteau. On considère qu'un continent normal (c'est-à-dire non déformé) est à l'équilibre isostatique lorsque sa surface est à l'altitude 0 avec une croûte d'épaisseur d_c=40 km. L'origine des coordonnées est prise à l'altitude 0.

1- Les racines continentales.

- En utilisant le principe d'isostasie, calculer l'épaisseur de la croûte continentale en fonction de l'altitude h de la chaîne de montagne.
- Pour h=5km, calculer la pression à l'altitude 0 sous la chaîne de montagne et dans un continent "normal". Même question à la côte z=-10 km.

2- La poussée tectonique.

La chaîne de montagne est maintenue par une poussée horizontale (appelée "tectonique") qui s'oppose à l'effondrement du relief et qui s'exerce sur la frontière séparant la chaîne et le continent "normal" (non déformé). On supposera que cette frontière est verticale.

- Dans ce problème, les contraintes horizontales s'exerçant sur la frontière comprennent les pressions. Montrer que les pressions des deux côtés de la frontière ne sont pas égales.
- Les processus géologiques se produisent avec une accélération négligeable et sont donc tels que les forces appliquées s'équilibrent. La force qui équilibre la différence de pression de part et d'autre de la frontière est la pousée tectonique. Dans quelle direction est-elle appliquée ?
- Calculer la force de poussée pour une chaîne d'altitude h.
- Calculer la contraine tectonique moyenne correspondante (force/surface).
- La poussée s'exerce parallèlement au mouvement convergent. Que se passe-t-il dans la direction orthogonale ? Quelles traces géologiques peut-on prévoir en conséquence ?

3- Les nappes de chevauchement.

L'épaississement ne se fait pas à la manière d'un accordéon mais par le biais de nappes de chevauchement. Une nappe de chevauchement a typiquement une épaisseur de 10 km et se prolonge sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres.

- La force motrice est la poussée tectonique. Quelle est la force qui résiste à la propagation de la nappe ?
- On définit le coefficient de frottement λ, tel que la contrainte de frottement σ est égale à :

$$\sigma = \lambda\, p$$

où p est la pression à la profondeur de la nappe.

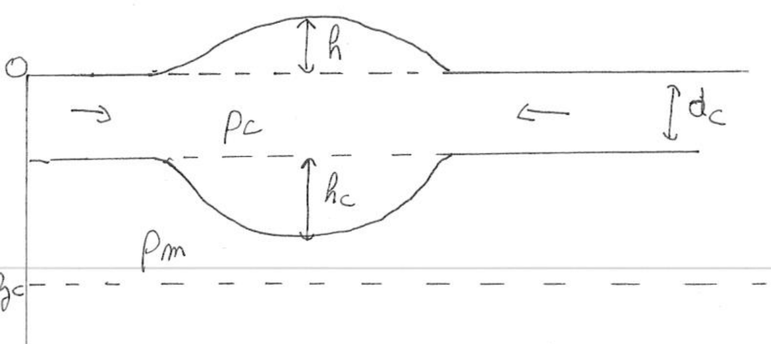
- Ecrire le bilan des forces horizontales qui s'exercent sur une nappe d'épaisseur e qui s'étend sur une longueur L à la profondeur z. On fera le calcul pour une largeur égale à l'unité et on supposera pour simplifier que la nappe est horizontale.
- Montrer qu'un équilibre est atteint pour une certaine longueur L_c. Donner l'expression de cette longueur. Que se passe-t-il lorsque cette longueur est atteinte ?
- Calculer le coefficient de frottement pour L_c = 200 km et z=10 km. Pour des roches du socle, qui sont sèches et très résistantes à la déformation, ce coefficient vaut environ 0.5. Comment expliquer votre résultat ?

Valeurs numériques.

$\rho_c = 2700$ kg m^{-3}

$\rho_m = 3300$ kg m^{-3}

La collision continentale



. Le phénomène de collision continentale est la confrontation de deux plaques continentales qui suit la disparition des lithosphères océaniques par subduction (c'est la deuxième phase du <u>phénomène de convergence</u>). Les Alpes et l'Himalaya sont des exemples de chaînes de collision.

. La croûte continentale est particulièrement épaissie (50-70 km) au lieu de 40 km habituellement, et forme une racine crustale profonde.

① <u>Les racines continentales.</u>

<u>Isostasie</u> $\Leftrightarrow$ la montagne est en équilibre hydrostatique

$\Rightarrow$ en $z_c > d_c + h_c$, la pression est partout la même.

$$\rho_m(z_c - d_c) + \rho_c d_c = (h + d_c + h_c)\rho_c + (z_c - d_c - h_c)\rho_m$$

$$\Rightarrow \quad h_c = \frac{\rho_c}{\rho_m - \rho_c} h.$$

Epaisseur de la croûte : $d = h + h_c + d_c$

$$\Rightarrow \quad d = d_c + \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_c} h = 67{,}5 \text{ km}.$$

. <u>Pression</u>

- continent "normal" : en $z = 0$, $P = 0$

on néglige la pression atmosphérique qui est bien plus faible que la pression hydrostatique dans la croûte.

en $z = -10$ km : $P = 2648$ bar.

Rappel : 1 bar $= 10^5$ Pa

- continent déformé :

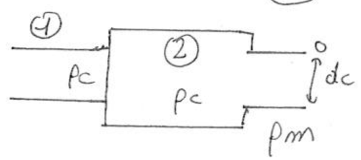
dans la chaîne de montagne, en $z = 0$

on a $P = \rho_c g h = 1324$ Bar.

en $z = -10$ km : $P = \rho_c g (|z| + h)$
$= 3973$ bar.

② <u>La Poussée tectonique</u>

Nous allons tout d'abord établir les profils de pression dans le milieu ① (continent normal) puis dans le milieu ② (chaîne de montagne).



Rappel : l'équation différentielle, pour un ρ variable, qui régit la pression hydrostatique est : $\dfrac{dP}{dz} = \rho g$

(voir démonstration faite en cours)

- milieu ① : on a $\dfrac{dP_{①}}{dz} = \rho g$

et on cherche $P_{①}(z)$.

$\Rightarrow$ on résoud l'équation différentielle linéaire :

- si $z < d_c$: $P_{①}(z) = \int_0^z \rho_c g\, dz = \rho_c g z$

- si $z > d_c$: $P_{①}(z) = \int_0^z \rho(z) g\, dz$

$$= \int_0^{d_c} \rho_c z g\, dz + \int_{d_c}^{z} \rho_m z g\, dz$$

$$= \rho_c g d_c + \rho_m g (z - d_c)$$

Milieu ② on a $\dfrac{dP_{②}}{dz} = \rho g$

et on cherche $P_{②}(z)$

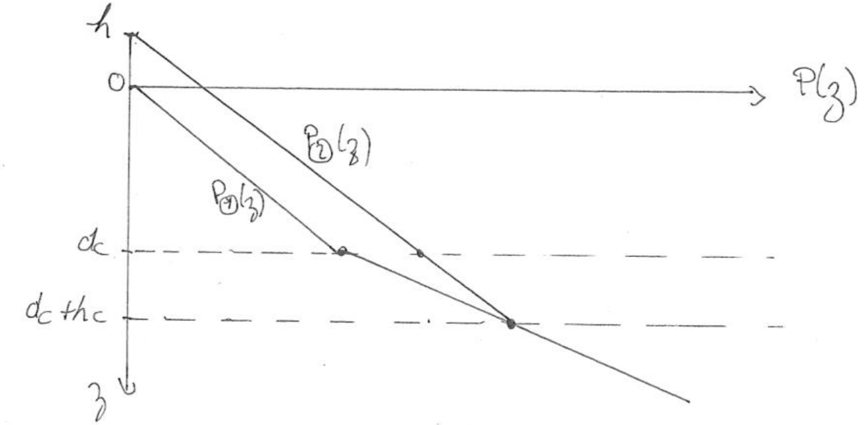
$\Rightarrow$ on intègre l'équation différentielle / à z

si $z < d_c + h_c$: $P_{②}(z) = \int_{-h}^{z} \rho_c g\, dz$

$$\Rightarrow P_{②}(z) = \rho_c g (h + z)$$

si $z > d_c + h_c$: $P_{②}(z) = \int_{-h}^{d_c+h_c} \rho_c g\, dz + \int_{d_c+h_c}^{z} \rho_m g\, dz$

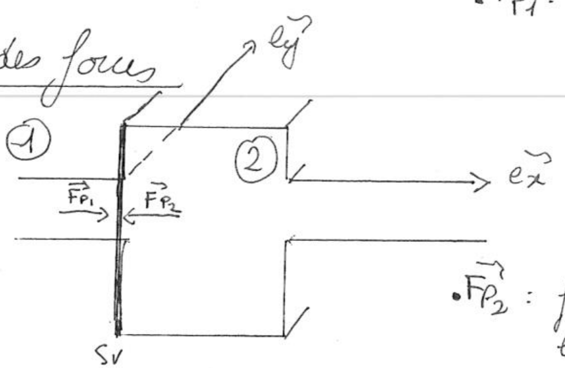
$$\Rightarrow P_{②}(z) = \rho_c g (d_c + h_c + h) + \rho_m g (z - d_c - h_c)$$



pour $z > d_c + h_c$, les pressions sont identiques pour les 2 milieux ① et ② car on est en équilibre hydrostatique.

$\Rightarrow$ pour un z fixé, la pression est plus forte dans le milieu ② (montagne) que dans le milieu ① (continent non déformé).

Equilibre des forces



• $\vec{F_{P_1}}$: force de pression dans le milieu ① agissant sur la surface verticale S_V

• $\vec{F_{P_2}}$: force de pression dans le milieu ② sur S_V.

on a évidemment $\vec{F_{P_2}} > \vec{F_{P_1}}$ pour un z fixé.

pour avoir l'équilibre, il manque une force $\vec{T}$ appelée poussée tectonique.

$$\vec{T} + \vec{F_{P_1}} + \vec{F_{P_2}} = \vec{0}$$

sur l'axe $\vec{e_x}$: $T_x + F_{P_1} - F_{P_2} = 0$

$$\Rightarrow \quad T_x = F_{P_2} - F_{P_1} > 0$$

Calcul de $\vec{F_{P_1}}$

la pression $P_①$ exerce une force $-\int_{S_V} P_① \vec{n}\, ds$ où

$\vec{n}$ est la normale à S_V : $\vec{n} = -\vec{e_x}$

S_V : surface verticale séparant les milieux ① et ② (dans le plan $(\vec{e_y}, \vec{e_z})$)

$ds = L\,dz$ où L est la longueur de la surface verticale suivant $\vec{e_y}$

$$\vec{F_{P_1}} = \int_0^{h_c} P_①(z)\, \vec{e_x}\, L\, dz$$

$$= L\vec{e_x}\left[\int_0^{d_c} \rho_c g z\, dz + \int_{d_c}^{h_c} \left[(\rho_c - \rho_m) g d_c + \rho_m g z\right] dz\right]$$

$$\vec{F_{P_1}} = \frac{L}{2} g \left[\rho_c d_c^2 + \rho_m h_c^2 + 2\rho_c d_c h_c\right] \vec{e_x}$$

Calcul de $\vec{F_{P_2}}$

$$\vec{F_{P_2}} = -\int_{-h}^{d_c + h_c} P_②(z)\, \vec{e_x}\, dz\, L$$

$$= -L\vec{e_x}\left[\int_{-h}^{d_c + h_c} \rho_c g (z + h)\, dz\right]$$

$$= -L\vec{e_x} \int_0^{d_c + h_c + h} \rho_c g Z\, dZ \quad \text{en posant } Z = z + h.$$

$\Rightarrow \vec{F_{P_2}} = -\frac{L}{2}\rho_c g\, d^2\, \vec{e_x}$ avec $d = d_c + h_c + h$

<u>Poussée tectonique</u> : $\vec{T} = -\vec{F_{P_1}} - \vec{F_{P_2}}$

$$\vec{T} = \frac{Lg}{2}\, \vec{e_x}\left[\rho_c d^2 - \rho_c d_c^2 - \rho_m h_c^2 - 2\rho_c d_c h_c\right]$$

si on remplace $h_c = \frac{\rho_c}{\rho_m - \rho_c} h$ (isostasie verticale)

on trouve : $\vec{T} = \frac{Lg}{2}\rho_c h\left[2d_c + \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_c} h\right]\vec{e_x}$

pour $h = 0$, on a bien sûr $T = 0$.

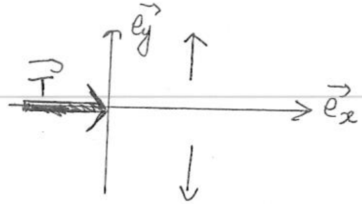
<u>Contrainte tectonique</u>

La contrainte est la force par unité de surface.
La surface caractéristique ici a pour dimension L suivant $\vec{e_y}$ et H, l'épaisseur de la plaque tectonique, suivant $\vec{e_z}$.

$$\rightarrow \sigma = \frac{T}{LH} = \frac{g\rho_c h}{2H}\left[d_c + d\right]$$

$$\simeq 593 \cdot 10^5\ Pa.$$

- Dans l'autre direction horizontale ($\vec{e_y}$) pas de poussée tectonique donc déformation active.
Extension.

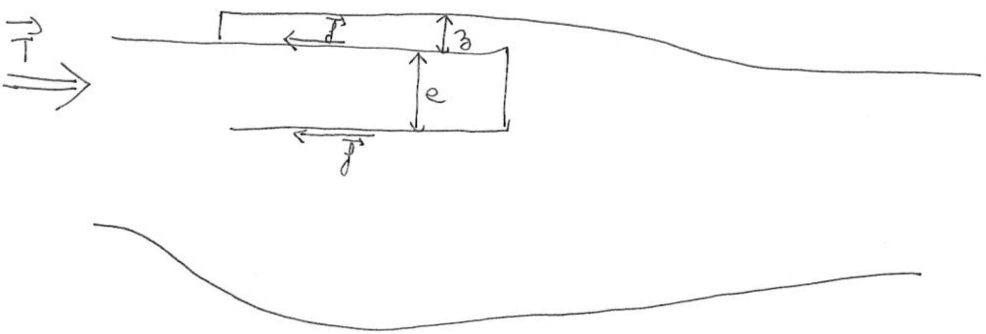


Traces géologiques : petits fossés (grabens)
+ failles normales (tremblements de Terre).

3) Les nappes de chevauchement

En profondeur, à quelques kilomètres, les températures et les pressions sont élevées et la roche se comporte comme une « pâte à modeler ».

→ cette déformation souple donne naissance aux plis ou aux chevauchements.



- la force de frottement $\vec{f}$ créé par la pression hydrostatique s'oppose à la propagation de la nappe.

- Contrainte de frottement : $\sigma = \lambda p$

où p est la pression à la profondeur de la nappe

λ le coefficient de frottement

- Bilan des forces horizontales.

$$T = \frac{\rho_c g_0 h}{2}(d + d_c) L_y = 7{,}12 \times 10^{12}\ \mathrm{Pa.m} \cdot L_y$$

où L_y est la dimension de la surface suivant $\vec{e_y}$.

- force de friction : $\lambda \left[\rho^c g z + \rho^c g (z+e) \right] \times L \times L_y$

Bilan des forces :

$$F_x = T - L . L_y \lambda \rho^c g [2z + e].$$

- si $F_x > 0$, la nappe avance.
- si $F_x = 0$ on a un équilibre, la nappe ne bouge plus.

on a alors $T - L_c \lambda L_y \rho^c g (2z + e) = 0$

$$\Rightarrow \quad L_c = \frac{T}{L_y} \frac{1}{\rho^c g \lambda (2z+e)}$$

Applications numériques :

si $L_c = 200$ km et $z = 10$ km

$\lambda = 0{,}045$

Le coefficient trouvé est très inférieur à 0,5.

On a une zone de « faiblesse » avec un faible coefficient de friction : couche de sédiments ?

ou présence d'eau ?

Remarque. Exemple des Appalaches.

Les études sismiques indiquent que la nappe est sur une fine couche de sédiments. Ces sédiments apparemment produisent une zone de « faiblesse » et un faible coefficient de friction (une nappe sur une zone de faiblesse (weakness zone en anglais) est aussi appelé « décollement »).

Remarque : si on a du fluide, avec une pression P_f, la contrainte de friction sera $\mu(P - P_f)$ et donc sera plus faible.

Le coefficient de friction, à l'équilibre, sera

$$\mu = \frac{T}{L . L_y (P - P_f)} > \frac{T}{L L_y P}$$

→ la présence de fluide dans la roche augmente le coefficient de friction.