

La déformation cassante

Tristan FERROIR (<http://tristan.ferroir.free.fr>)

Introduction

Comme son nom l'indique la déformation implique une modification de la forme de l'objet considéré et de façon cassante c'est à dire avec une rupture. Cette déformation s'oppose à la déformation ductile qui fait appel dans ce cas à une modification de forme sans discontinuité. Pour autant, ces deux déformations ne sont pas si distinctes ou son tout du moins intrinsèquement liées. Nous nous proposons ici de voir quelles sont les manifestations de la déformation cassante et les structures qui lui sont associées afin d'en donner une définition complète; nous verrons aussi quels sont les mécanismes et les paramètres physiques qui interviennent dans cette déformation. Nous verrons enfin comment intégrer cette déformation cassante dans la géodynamique globale.

I La déformation cassante : manifestations et structures associées

A Les manifestations de la déformation cassante actuelle

- Manifestation la plus spectaculaire : la sismicité
- Notion de rupture, de déplacement et de durée en lien avec la magnitude de moment
- Etude d'un seisme dans un contexte géodynamique (par exemple le Sichuan)
- Phénomène étudiable à l'échelle humaine

B Les structures cassantes à différentes échelles

- Présenter des images de déformation cassante à différentes échelles : satellitaire, carte géologique, affleurement, échantillon voir lame mince : on peut essayer d'avoir des échantillons reflétant les trois grands types de mouvements
- On illustre ici aussi les miroirs de failles, les gradins de calcite, les diaclases, les fentes de tension...

C Définition de la déformation cassante

- C'est une déformation discontinue, localisée le long d'un plan de glissement sans épaisseur, le plan de fracture contrairement à la déformation ductile qui est continue et distribuée sur une certaine épaisseur
- Cependant, le caractère localisé de la déformation dépend bien entendu de l'échelle d'observation et même des matériaux (par exemple les feldspaths d'un gneiss ayant subi un cisaillement ductile sont souvent déformés de façon cassante).

II Les mécanismes de la déformation cassante

A Le comportement cassant

- Rappel des différents comportements rhéologiques : élastique, ductile, cassant
- Rappel des paramètres physiques influençant la déformation des roches :
 - la température : son augmentation abaisse le seuil de la transition plastique et donc la quantité de déformation plastique avant la rupture
 - la pression de confinement : elle augmente avec la profondeur et retarde la rupture des roches
 - la vitesse de déformation : quand elle augmente, le domaine plastique diminue et la roche devient plus cassante
- La transition élastique-plastique-cassant dépend des trois paramètres précédents, donc de la profondeur mais aussi de la nature des matériaux. La limite fragile-ductile pour les matériaux ne se fera pas à la

même profondeur : c'est ce qui va fonder les enveloppes rhéologiques de la lithosphère

- On présente cette enveloppe rhéologique

B Modes et mécanique de la rupture

- La rupture à l'échelle de l'échantillon : Griffith (1924) a abordé l'initiation et la propagation des fissures d'un point de vue énergétique. En dehors de toute sollicitation mécanique, il existe des micro-défauts dans la roche. Ceux-ci peuvent être activés par si l'énergie élastiques des contraintes mécaniques qui s'appliquent aux extrémités de la fissure dépassent l'énergie de cohésion du matériau.
- La rupture sismique :
 - à la fin de la période présismique, les contraintes tectoniques sont proches du seuil de rupture. Les forces de friction empêchent le glissement sur la faille jusqu'à ce que la contrainte de cisaillement dépasse un seuil de friction statique.
 - une fois ce seuil dépassé, c'est le séisme ou PAS... Si la friction se fait de façon relativement constante une fois le glissement commencé alors la faille joue de façon stable et asismique. Si la friction chute brutalement, alors la faille devient sismique.
- On peut aussi expliquer la recurrence des séismes par exemple au niveau de San Andreas : les foyers des séismes ne dépassent pas 20 km de profondeur; par ailleurs, pendant les périodes de silence sismique, deux zones de 20 km de large chacune, situées de part et d'autre de la faille, subissent une déformation élastique, et cette déformation élastique est relaxée brutalement au cours du séisme. Dans le modèle du rebond élastique, de part et d'autre de la faille, les compartiments de croûte continentale profonde ductile se déplaceraient l'un par rapport à l'autre de façon asismique. La croûte supérieure, fragile, ne pourrait pas suivre ce mouvement; elle se déformerait donc de façon élastique jusqu'au moment où les contraintes dépassent le seuil de friction statique critique; le séisme se produirait alors, la croûte supérieure "rattrapant" la croûte inférieure

C Les contraintes : un fil directeur pour l'interprétation simple des structures cassantes

- Une contrainte est le rapport entre la force exercée sur une surface. La plupart du temps cette contrainte est oblique à la surface : on la décompose en un vecteur normal σ et un vecteur tangentiel τ .
- En 3D, on a des contraintes orientées qui définissent le tenseur des contraintes qu'on va pouvoir transformer mathématiquement en une représentation simplifiée : l'ellipsoïde des contraintes ou on définit $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.
- On explique comment construire le tricerclé de Mohr dans un cas simple, à partir d'une expérience. On obtient la cohésion du matériau et l'angle de friction.
- La déformation par aplatissement forme des systèmes confugés alors que la déformation par cisaillement simple forme des couloirs de failles non conjugués.

D Quelques exemples de modélisation analogique et numérique de la déformation cassante

- But de ces modélisations :
 - obtenir des données 3D alors que les observations de terrains ne sont que 2D (basée sur le terrain pour les parties superficielles, sur la sismique pour les parties profondes)
 - obtenir des données temporelles, notamment en terme d'évolution car on peut observer les phénomènes en continu
 - obtenir des idées sur les grands paramètres influençant les processus tectoniques en permettant de tester la validité mécanique de différentes hypothèses.
- Il est important de dimensionner les expériences. Par exemple, pour la croûte supérieure on utilise un sable de quartz dont les angles de frottement sont similaires (30°) et pour un facteur d'échelle de 1cm pour 10km, la cohésion du sable passe de 50MPa à 5.10⁻⁵MPa ce qui est acceptable. Pour la croûte inférieure ductile, on utilise du silicone.
- On peut l'illustrer par les modèles analogiques comme le rifting (cf. cours rifting) ou par les images du poinçonnement rigide au niveau de la collision Inde-Asie.

III La déformation cassante dans la géodynamique

A Déformation cassante en contexte de divergence : rifts, marges passives et divergence des plaques

- A partir de l'étude du fossé rhénan, on peut montrer le caractère faillé des bordures du fossé et l'évolution des failles en profondeur
- On étend aux marges passives ou on peut montrer que la géométrie des dépôts, notamment les syn-rift, sont dépendants de la déformation cassante associé
- On termine par une comparaison dorsale atlantique-dorsale pacifique où on peut voir l'influence de la vitesse de déformation sur la taille des failles et sur l'influence qu'elles ont sur l'hydrothermalisme, le complexe filonien etc etc...

B Déformation cassante en contexte de convergence : subduction et collision

- Un premier pic de sismicité se trouve vers 50-100km de profondeur : on illustre ici malgré l'existence d'une forte pression de confinement l'importance de la libération de fluide dans l'abaissement du seuil de rupture : notion de fracturation assistée par les fluides
- Un deuxième pic vers 600km qui ne peut pas s'expliquer de la même façon et que certains interprètent comme dus aux transitions de phase.
- Plus superficiellement, on voit le rôle de la déformation cassante dans la formation d'un prisme d'accrétion (le profil du Nankai est assez typique de ce côté là) + les déformations cassantes intrachaines compressives et extensives montrées par les mécanismes aux foyers

C Déformation cassante en contexte de décrochement : grands coulissages et failles transformantes

- L'exemple de la faille de San Andreas permet d'illustrer les techniques d'étude permettant la mesure des déplacements (VLBI, GPS) : mouvement d'environ 30mm/an. C'est une faille à jeu dextre comme l'indiquent les mécanismes aux foyers avec un des plans nodaux parallèles à la faille.

- Permet la formation de bassin en pull-apart
- Les failles transformantes

Conclusion

La déformation cassant résulte donc de l'accumulation de contraintes tectoniques et représente l'étape ultime de la déformation et peut se manifester en surface par l'existence de séisme. Cette déformation a été étudiée de façon aussi bien théorique qu'expérimentale et a une influence sur la géodynamique globale de la Terre. De nombreux paramètres physiques la contrôle et fonde ainsi son existence ou non.

Cette déformation est aussi fortement étudiée pour des raisons géotechniques ou à des fins de prévisions des séismes.

Bibliographie

- Mercier, Vergely : "Tectonique",
- Dunod - Jolivet : "La déformation des continents",
- Cazenave et Feigl : "Formes et mouvements de la Terre"
- Nataf et Somméria : "La physique et la Terre"
- Boillot et Coulon : "La déchirure continentale et l'ouverture océanique",
- Debelmas et Mascle : "Les grandes structures géologiques",
- Masson - Choukroune : "Déformations et déplacements de la croûte terrestre",
- Masson - Juteau et Maury : "Géologie de la croûte océanique"
- Madariaga et Perrier : "Les tremblements de Terre"
- Lemoine et al. : "De l'océan à la chaîne de montagnes"
- Lliboutry : "Géophysique et géologie"
- Caron et al. : "Comprendre et enseigner la planète Terre", Ophrys -
- Cara : "Géophysique", Dunod