

## Simulations du champ de déformation statique de grands séismes

- Jean-Claude Ruegg (IPGP)– version3 (oct\_2014)

*Résumé : Des simulations du champ de déformation statique des grands séismes sont réalisées dans les heures qui suivent la publication de l'évènement par les agences sismologiques telles que l'USGS ou le projet Global Centroid Moment Tensor de Harvard . Elles sont ensuite publiées sur le web à destination des collègues sismologues/géodésiens de la communauté scientifique française.*

*Après l'occurrence d'un séisme, les agences sismiques publient très rapidement des données concernant la source (origine, hypocentre, magnitude, mécanisme focal,...)*

*Avec ces informations on construit un modèle de source qui permet d'anticiper le champ de déformation associé au séisme et notamment de calculer les vecteurs-déplacement à la surface du sol dans la région affectée par le séisme, afin de prévoir, en première approximation, les déplacements attendus sur les stations GPS des réseaux existants.*

*Des interférogrammes synthétiques sont aussi fabriqués afin de faciliter le choix des images radar nécessaires à l'étude par interférométrie radar de la source sismique. Enfin dans la version récente de cet ensemble de programmes des profils de déformation (ou coupes) sont réalisées à travers différentes lignes perpendiculaires au plan de faille.*

### *Introduction :*

Les agences de notification de séismes (USGS/NEIC, Harvard) publient sur leur site web, très peu de temps après l'occurrence d'un séisme, des informations sur la localisation de l'hypocentre et sur les mécanismes au foyer correspondants. Ceci équivaut à déterminer les caractéristiques géométriques d'un plan de faille (position, dimension, orientation, et déplacement) - voir Annexe - Relations fondamentales sur les grands séismes .

### *Détermination d'un modèle :*

Ces renseignements qualitatifs permettent d'élaborer un modèle simple de dislocation, prenant en compte la géométrie du plan de faille, ce qui permet de calculer les déplacements statiques attendus sur un certain nombre de points du terrain autour de la zone affectée par le séisme.

Ainsi sont déterminés (voir Annexe) les paramètres suivants

- les éléments géométriques caractérisant le plan de faille

la position du centroïde (longitude, latitude, profondeur): long., lat., prof.

la direction et le plongement (strike, dip) du plan de faille

- les éléments caractérisant la force du séisme

le glissement moyen qui est déterminé à partir du moment sismique  $M_0$  (ou de la magnitude) et le rake qui caractérise l'orientation du vecteur glissement dans le plan de faille.

### *Calcul de la déformation statique à la surface du sol :*

Pour calculer la déformation théorique à la surface du sol, on utilise un programme appelé "deformew2.f" écrit en fortran par J.C. Ruegg (2002-2012) à partir d'un formalisme élaboré par Okada (1985).

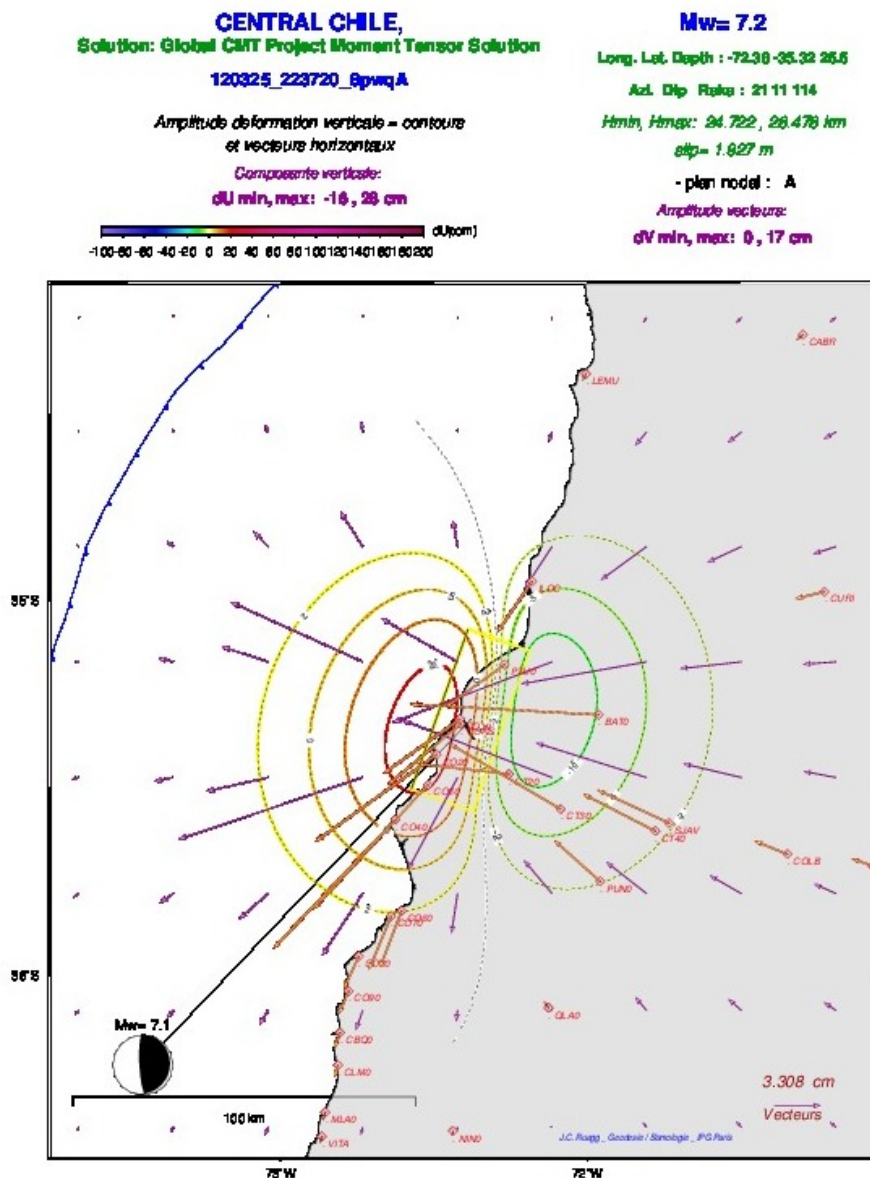
En effet, celui-ci a développé à partir de la théorie des dislocations dans un demi-espace élastique et homogène, des équations permettant de calculer par intégration les déplacements à la surface libre du demi-espace.

*Figuration des déplacements simulés :*

On calcule ainsi les déplacements théoriques attendus sur une grille de points régulièrement répartis à la surface du sol au voisinage du séisme, soit les déplacements attendus sur un certain nombre de points qui peuvent être des stations d'observation GPS.

Les résultats sont donnés sous la forme de dessins figurant des champs de vecteur associées à des courbes de déplacement vertical :

*Exemple1 : Simulation d'un séisme Mw=7,2 survenu au Chili dans la région de Talca le 25 mars 2012 – Champ de vecteurs sur une grille et sur les stations du réseau permanent du LIA - Montessus de Ballore (Univ. de Chile – INSU/CNRS), Figure : 120325\_223720\_8pwqA.SP.jpg*



ou par la simulation d'interférogrammes synthétiques comparables à ceux qu'on peut obtenir à partir de données d'interférométrie radar (INSAR).

**lieu: CENTRAL CHILE,**  
**120325\_223720\_8pwqA**

**Mw= 7.2**

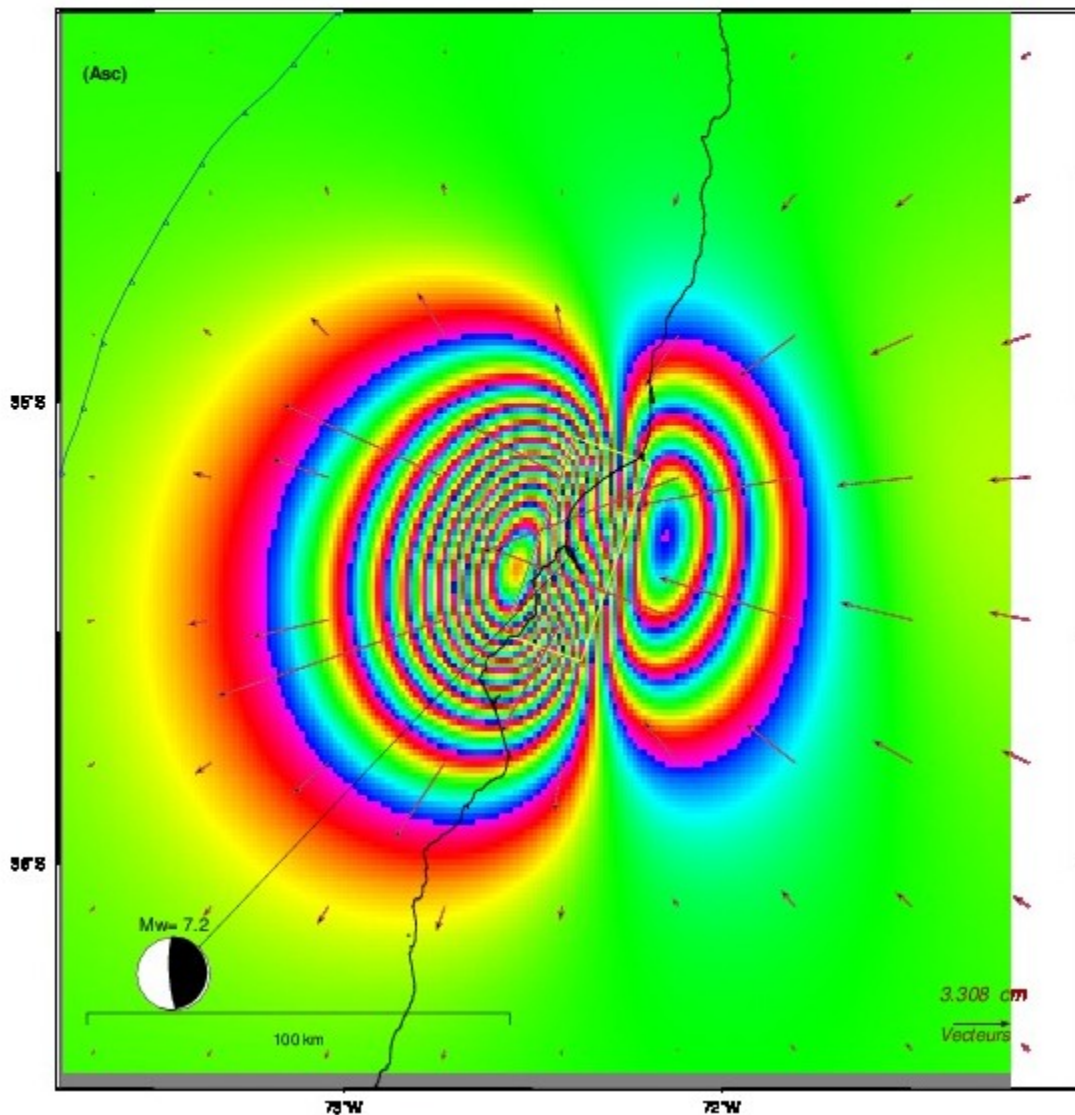
Long. Lat. Depth : -72.38 -35.32 26.6

Azi. Dip Strike : 21 11 114

Interférogramme théorique - orbites ascendantes

120325\_223720\_8pwqA

- plan nodal : A

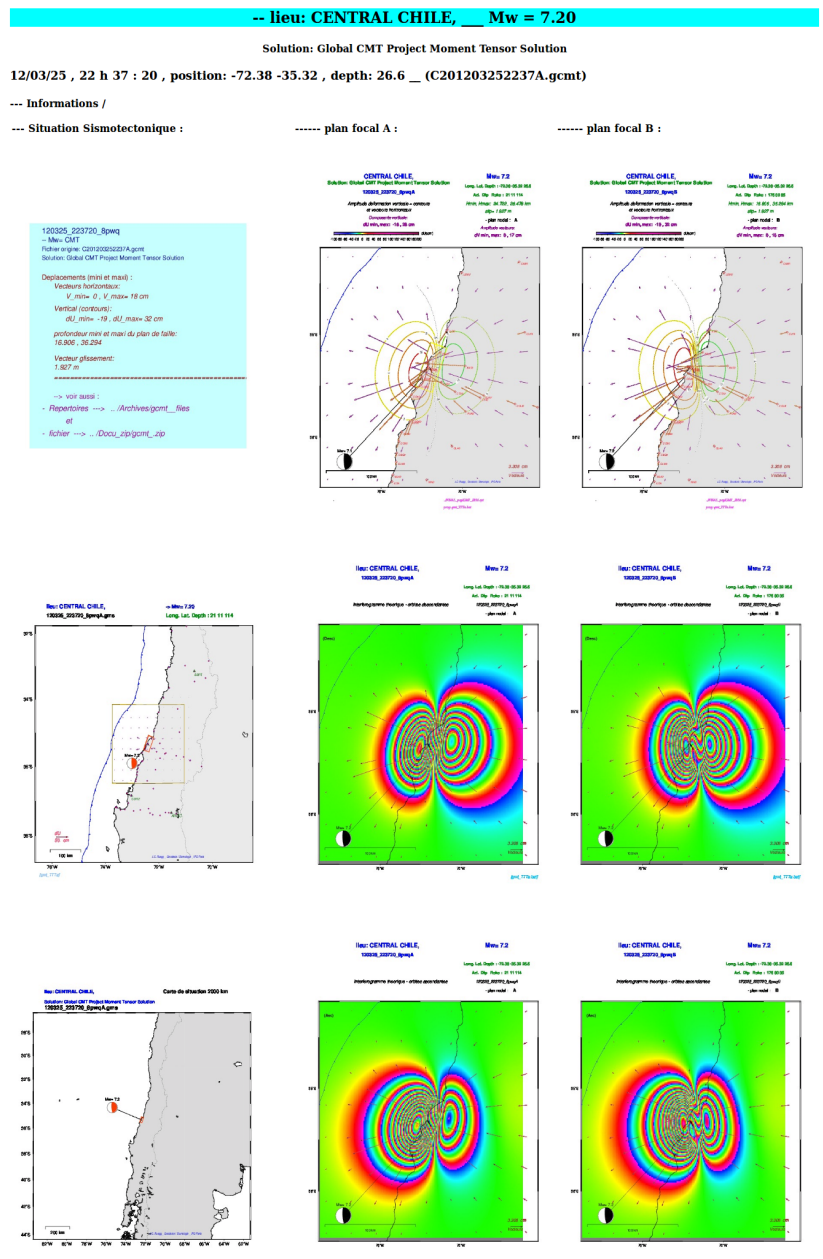


Exemple 2 : Simulation d'un séisme Mw=7,2 survenu au Chili dans la région de Talca le 25 mars 2012 – Interférogramme théorique orbite ascendante et plan de faille A - figure : 120325\_223720\_8pwqA.INT\_a.jpg

Pour chaque séisme simulé, 8 figures différentes sont produites (et rendues disponibles sur le web) :

- 2 figures de situation / localisation du séisme dans le contexte sismo-tectonique
- 2 figures de champs de vecteur-déplacement, une pour chaque plan focal déterminé par la solution du tenseur de moment-sismique.
- 4 figures d'interférogramme théorique, deux par plan focal, une correspondant à une orbite montante, l'autre à une orbite descendante du satellite radar Envisat.

L'ensemble de ces figures est schématisé sous la forme d'un fichier html, publiable sur le web, dont on peut aussi donner un extrait sous forme d'une figure au format pdf. Mais la résolution graphique de ce fichier est médiocre,



## *Commentaires*

Ce ne sont que des modèles (que j'appelle aussi "simulation") des déplacements attendus sur le terrain et non le résultat de véritables mesures de terrain. Mais l'expérience de nombreux séismes nous a montré que ces champs de déformation simulés sont assez proches de ceux qu'on obtiendra par la suite par le traitement de données géodésiques réelles.

Ces simulations servent essentiellement à nos collègues géodésiens /sismologues à voir quand survient un séismes, si ça vaut ou non la peine de se déplacer sur le terrain pour faire des mesures réelles.

Ce genre de simulation est réalisé de manière quasi systématique, depuis la fin des années 2000, pour tout séisme de magnitude supérieure à 6 ou 7 (selon les cas), c'est à dire susceptible de donner des déformations mesurables sur le terrain par les techniques actuelles d'évaluation du champ de déformation (GPS ou INSAR).

Par exemple, lorsqu'est survenu le séisme de magnitude 8.8 au Chili le 27 février 2010, une simulation de ce genre qui a permis aux équipes de l'INSU (C. Vigny et R. Madariaga) d'évaluer assez grossièrement, l'importance et la localisation des principales zones de déformation avant même d'y arriver avec des instruments.

Récemment, pour le séisme du Mexique du 20 mars 2012 (Oaxaca,  $M_w=7,3$ ) des mesures GPS sont réalisées par différentes équipes (américaines et françaises) qui ont des programmes de recherche dans cette région. La cellule « post-séismique » de l'INSU a publié sur son site web, des informations destinées aux équipes sismologiques françaises concernées par d'éventuelles interventions.

La détermination rapide et automatique du champ de déformation associé aux grands séismes constitue un outil efficace et informatif pour la connaissance des grands séismes associés à une province sismique comme pour anticiper une campagne de mesure ou une acquisition d'images satellitaires

-----

## Annexe : Relations fondamentales sur les grands séismes

### *Solutions focales et géométrie du plan de rupture*

*par Jean-Claude Ruegg (IPGP)*

Les solutions focales des agences sismiques fournissent les paramètres suivant :

- la date et le temps origine du séisme,
- le moment sismique  $M_0$  et/ou la magnitude  $M_w$  correspondant à l'énergie du séisme.
- les coordonnées géographiques du foyer centroïde (longitude, latitude et profondeur); le centroïde est le centre du double couple représentant la rupture; il est différent de l'hypocentre qui correspond au point d'initiation de la rupture sur le plan de faille.
- Les paramètres d'orientation du plan de faille et du glissement sur la faille, soit 3 paramètres: azimut (ou strike) du plan de faille, l'angle de plongement (ou dip) du plan de faille, et l'orientation du vecteur glissement par rapport au plan horizontal (ou rake), voir Aki et Richards (1981).

En raison de l'impossibilité par les seules observations sismologiques de trancher entre les deux plan de failles, le plan de rupture réel et son plan auxiliaire prévu par le modèle du "double couple" (Madariaga et Perrier, 1991, p.108), les agences sismiques fournissent les paramètres d'orientation pour chacun de ces deux plans (plan 1 ou A et plan 2 ou B). Le choix final entre les deux plans sera ensuite établi en raison de considérations tectoniques (rupture de surface si elles existent), ou sismologiques autres (distribution des répliques).

Le fichier 'neic\_c0008pwq.cmt', que l'on récupère sur le site :

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2012/>, comporte ces informations, et l'indétermination entre les 2 plans de faille conduit à deux ensembles de 7 paramètres qui permettront de calculer un champ de déformation pour chacun. Ces informations sont d'abord condensées dans 2 fichiers mécanisme focal du type 'psmeca' de GMT que l'on nomme "aammjj\_hhmmss\_xxxxY.usg" contenant dans l'ordre :

*Longitude, latitude, profondeur, azimut, plongement, rake, Mw, longitude, latitude, commentaires*

Nota: dans la chaîne de caractère "aammjj\_hhmmss\_xxxxY.usg" nommant le fichier des paramètres focaux, "aammjj" est la date du séisme (année, mois, jour), "hhmmss", l'heure origine (heure, minute, seconde), xxxx, 4 caractères présents dans l'URL d'accès au site du NEIC/USGS et Y le plan nodal (A ou B).

Pour calculer la déformation théorique à la surface du sol, correspondant à l'un de ces fichiers, on va utiliser un formalisme dû à Okada (1985) qui a développé à partir de la théorie des dislocations dans un demi-espace élastique et homogène, des équations les intégrant sur un plan de faille fini. On utilise ici un programme "defornew 2.f" écrit en fortran par J.C. Ruegg à partir de la formulation d'Okada. Ce programme permet plusieurs formats d'entrée différents bien adaptés à la représentation du champ de déformation (différents formats de failles aussi bien que formats des points de calcul : points discrets, grille, coupe,...), mais ses paramètres d'entrées sont légèrement différents des paramètres focaux issus de l'USGS et l'on fabrique de manière quasi-automatique des fichiers paramètre lisibles par le programme fortran defornew2 à partir des fichiers "aammjj\_hhmmss\_xxxxY.usg",

A partir de ceux ci on va devoir déterminer les dimensions géométriques d'un plan de faille rectangulaire (longueur et largeur) et déterminer un vecteur glissement. Le processus de cette transformation est décrit ci dessous:

Formules utilisées :

$$\log Mo = 1.5 * Mw + 9. \quad \text{Kanamori (1977)}$$

$$Mo = \alpha \cdot L^3 \quad \text{Scholz (1990), Madariaga et Perrier (1991), p.126}$$

$$Mo = \mu \cdot S \cdot du \quad \text{Scholz (1990), p.177; Madariaga et Perrier (1991), p.195}$$

avec  $\mu$  = rigidité du milieu, S = Surface de la rupture,  $du$  = déplacement moyen

#### - calcul du moment sismique $Mo$ :

On utilise la relation fondamentale de Kanamori (1977) pour calculer le moment sismique  $Mo$  à partir de la magnitude d' énergie  $Mw$ , qui est donnée en colonne 7 du fichier "aammjj\_hhmmss\_xxxxY.usg" :

$$\log Mo = 1.5 * Mw + 9. = \gamma \quad \rightarrow \quad Mo = 10^{*\gamma} \quad (\text{avec } Mo \text{ en N-m Newton-mètre})$$

#### - calcul de la longueur caractéristique $Lc$ :

$Lc$  s'obtient à partir d'une formule de loi d'échelle (Scholz, 1990):  $Mo = a \cdot Lc^3$

Le coefficient  $a$  varie entre  $1 \cdot 10^6$  à  $20 \cdot 10^6$  Pa; ici on prendra  $a = 1.3 \cdot 10^6$  (Pascal), valeur empirique calibrée sur quelques grands séismes d'Amérique du Sud pour lesquels la dimension de la rupture est assez bien connue soit par une inversion de la distribution de glissement, soit à partir de la distribution des répliques (ex: Antofagasta  $Mw=8.1$ (1995), Ruegg et al., 1996, Chlieh et al., 2002).

$$Lc^3 = Mo / a \quad \rightarrow \quad Lc = \text{racine cubique de } Lc^3$$

#### - éléments géométriques caractérisant le plan de faille :

A partir de la longueur caractéristique  $Lc$  et des éléments géométriques fournis sous forme angulaire dans le fichier "aammjj\_hhmmss\_xxxxY.usg" (col. 1-6), c'est-à-dire :

\* Position du centroïde (longitude, latitude, profondeur): long., lat., prof. (col.: 1-3)

\* Direction, plongement et rake (strike, dip, rake en col. 4-6)

on va calculer les dimensions géométriques de la faille longueur  $Lt$  et largeur  $W$ , puis on va calculer une valeur de glissement moyen sur la rupture ainsi définie. Pour les grands séisme, en particulier de subduction, la longueur est généralement plus grande que la largeur, du fait que celle-ci est limitée en profondeur à cause de la rhéologie<sup>1</sup>. Pour la détermination rapide du champ de déformation des grands séismes à partir des solutions focales des agences sismique on détermine une largeur de faille  $Wa$  (largeur de la faille selon la ligne de plus grande pente du plan de faille) et une longueur de faille  $Lt$  (longueur horizontale selon l'azimut de la faille), d'après les relations empiriques de Wells et Coppersmith (1994), ainsi qu'une valeur de glissement moyen sur la rupture,  $\delta u$ .

1 Wells et Coppersmith (1994), "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, BSSA, 84, No.4, pp.974-1002, 1994,

A titre indicatif, le petit tableau suivant donne les valeurs de  $W_a$ ,  $L_t$ , du coefficient de forme  $cf=L_t/W_a$  et du glissement moyen pour les seisme de magnitude  $5 < M_w < 9.0$ , d'après les relations de Wells et Coppersmith (BSSA, 1994) :

$$W_a = 10^{(a1)} \quad \text{avec} \quad a1 = 0,41 M_w - 1,61$$

$$R_t = 10^{(a2)} \quad \text{avec} \quad a2 = 0,58 M_w - 2,42$$

Mw	Wa (km)	Lt (km)	cf=Lt/Wa	du (m)
5,5	4,4	5,9	1,35	0,21
6	7,1	11,5	1,62	0,37
6,5	11,4	22,4	2	0,67
7	18,2	43,6	2,4	1,21
7,5	29	85	2,9	2,17
8	46,8	166	3,55	3,9
8,5	72	323	4,5	7

*pm* : ancienne relation utilisée avant octobre 2012 pour déterminer les valeurs de  $W_a$  et  $L_c$  :  
*coefficient de forme  $\phi = L_t/W = 2.56 \rightarrow W=L_c*0.625$ ,  $L_t=L_c*1.6$*

- **glissement moyen** :  $\delta u$  est déterminé aussi à partir de  $M_o = \mu \cdot S \cdot \delta u$  :

$\delta u = M_o / S / \mu$  ou  $M_o$  est exprimé en Newton-mètre  
avec  $\mu$  = module de rigidité moyen pour la croûte terrestre :  $\mu = 3.3 \cdot 10^{10}$  Pascal  
et  $S$  = surface de la faille exprimée en mètre-carrés

### Fichier paramètres de failles :

On va ainsi élaborer un fichier de paramètres de faille ("aammjj\_hhmmss\_xxxxY.par") utilisable dans un programme de modélisation (ici le fichier d'entrée du programme "defornew2.f" écrit par J.C. Ruegg d'après le formalisme d' Okada [1985]) permet de calculer le déplacement à la surface d'un demi espace élastique homogène sur n'importe quel site situé en ( $X_s$ ,  $Y_s$ ), ou sur une grille permettant de réaliser des dessins par GMT.

Ce fichier est constitué par 9 paramètres, et organisé de la façon suivante sur 4 lignes:

- \* 1 : ligne Titre
- \* 2 : ligne commentaire donnant la structure des 2 lignes suivantes
- \* 3 : wa, rt, Azim, rake (largeur et longueur de la faille en km, azimuth et rake en degres)
- \* 4 : x, y, h, teta , slip ( coordonnées du centre de faille , plongement et amplitude du glissement)

avec x, y coordonnées du centroïde donnés soit en km (UTM) soit en degres (longitude, latitude, h: profondeur).

## Exemples :

### 1) le fichier concernant le séisme du XINJIANG de 2008 :

On a récupéré le fichier 'xneic\_pvcl.fmt' sur le site de l'USGS

[http://neic.usgs.gov/neis/FM/neic\\_pvcl\\_cmt.html](http://neic.usgs.gov/neis/FM/neic_pvcl_cmt.html)

Le contenu de ce fichier **xneic\_pvcl.fmt** nous fournit les paramètres focaux :

```
08/03/20 22:32:58.29
XINJIANG-XIZANG BORDER REGION
Epicenter: 35.398 81.396
MW 7.2
```

```
USGS CENTROID MOMENT TENSOR
08/03/20 22:33:16.00
Centroid: 35.393 81.020
Depth 14 No. of sta:145
Moment Tensor; Scale 10**19 Nm
Mrr=-5.53 Mtt=-0.21
Mpp= 5.74 Mrt= 4.79
Mrp= 3.61 Mtp= 1.47
Principal axes:
T Val= 7.90 Plg=21 Azm=293
N 0.86 19 31
P -8.76 60 159
```

```
Best Double Couple:Mo=8.3*10**19
NP1:Strike=353 Dip=29 Slip=-131
NP2: 219 69 -68
```

### 2) Analyse automatique du fichier .fmt et détermination des paramètres focaux pour le programme 'deformew2' de la simulation Okada

Après analyse automatique par le programme "meca\_mod\_4x" , 2 fichiers '080320\_223258\_pvclA.usg' et 080320\_223258\_pvcl B.usg sont obtenus pour chacun des 2 plans de failles A et B.

Le contenu du fichier '080320\_223258\_pvclA.usg' est :

```
81.02 35.39 14.0 353.0 29.0 -131.0 7.2 81.02 35.39 080320_223258_pvclA.usg xneic_pvcl.fmt XINJIANG-XIZANG BORDER REGION
```

avec dans l'ordre suivant : *long. lat. prof. azim plong. rake Mw lon. lat. nom\_fichier, texte*  
où *texte = description du lieu du séisme donné par l'USGS*

Pour ce séisme de magnitude  $M_w = 7.2$ , la longueur caractéristique sera  $L_c = 31.5$  km, il s'ensuit  $W_a = 22.0$  et  $L_t = 57.00$  km et un vecteur glissement de  $1.93$  m

Le fichier de paramètres de faille résultant est '080320\_223258\_pvclA.par' avec pour contenu :

```
Titre : Fichier .par issu de 080320_223258_pvclA.usg
# 1: wa,rt,Azim,rake, 2: xm,ym (deg),hm,teta(deg),slip(m) #
22.0 57.0 353.000 -131.000
81.0 35.4 14.000 29.000 1.53
```

L'introduction de ces paramètres dans le programme 'deformew2' (Okada) permet d'obtenir des cartes de déformation simulée :



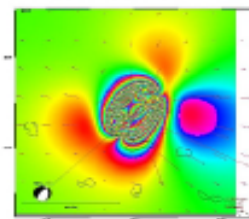
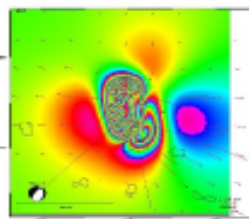
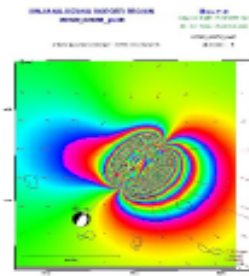
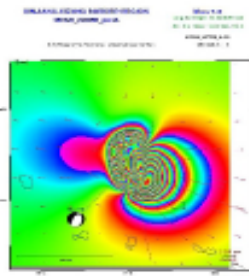
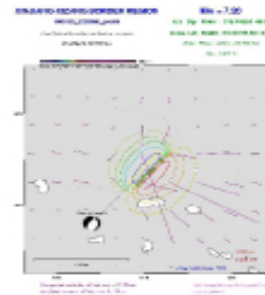
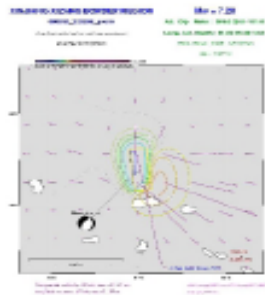
## XINJIANG-XIZANG BORDER REGION \_\_ Mw = 7.2

08/03/20 , 22:32:58.29 , Epicenter: 35.398 81.396 , depth: 14 \_\_ (neic\_pvcl)

--- Situation Sismotectonique :

----- plan focal A :

----- plan focal B :



### Bibliographie :

#### Générale :

- Aki K. & Richards P.G., Quantitative Seismology, Freeman, San Francisco, 1981.
- Madariaga R. et Perrier G., Les tremblements de Terre, Ed: Presses du CNRS, 1991
- Scholz, C. H., 1990, The mechanics of earthquakes and faulting, Ed. Cambridge Univ. Press, New York, 439 pp.

#### Modeles :

Okada Y, Surface deformation to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seism. Assoc. Amer.*, **75**, 1135-1154, 1985.

#### Co-seismic displacement for large earthquakes :

Ruegg J.C., J. Campos, R. Armijo, S. Barrientos, P. Briole, R. Thiele, M. Arancibia, J. Canuta, T. Duquesnoy, M. Chang, D. Lazo, H. Lyon-Caen, L. Ortlieb, J.C. Rossignol and L. Serrurier, The Mw=8.1 Antofagasta earthquake of July 30, 1995 : First results from teleseismic and geodetic data, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 9, 917-920, 1996.

Ruegg J.C., M. Olcay and D. Lazo, Co- post- and pre(?) -seismic displacements associated with the Mw=8.4 Southern Peru earthquake of 23 June 2001 from continuous GPS measurements, *Seismol. Res. Lett.*, **72**, 673-678, 2001.

(...révisé par J.C. Ruegg le 15/10/13)