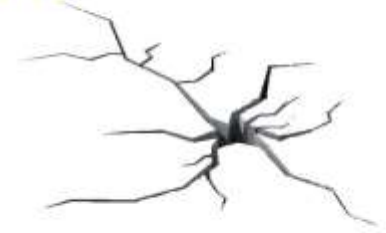




Interreg
ALCOTRA



RISVAL



Fonds européen de développement régional
Fondo europeo di sviluppo regionale

WP3- Mécanismes au foyer des séismes majeurs de la zone Alcotra

Bertrand Delouis pour la contribution CNRS

La contribution de CNRS-Géoazur sur les mécanismes au foyer a consisté en :

- 1)** Consolidation de la démarche permettant le calcul automatique et rapide des mécanismes au foyer dans la zone ALCOTRA, tirant parti du réseau de stations sismologiques large bande et accélérométriques temps réel françaises, italiennes, et suisses.
- 2)** Développement d'une approche de révision complète de la localisation hypocentrale et du mécanisme au foyer de séismes choisis
- 3)** Mise en place d'une page web permettant de visualiser les mécanismes au foyer automatiques et révisés
- 4)** Echanges et comparaison des solutions mécanismes au foyer avec celles déterminées par UNIGE

1) Consolidation de la démarche permettant le calcul automatique et rapide des mécanismes au foyer dans la zone ALCOTRA, tirant parti du réseau de stations sismologiques large bande et accélérométriques temps réel françaises, italiennes, et suisses.

La méthode automatique d'inversion des formes d'ondes pour l'obtention du mécanisme au foyer, FMNEAR (Delouis, 2014), a été implémentée au laboratoire Géoazur **du CNRS** en interfaçage avec le système de détection et de localisation Seiscomp3 utilisé pour le suivi de la sismicité régionale (<http://sismoazur.oca.eu/>). Au cours de la période du projet RISVAL, les nouvelles stations sismologiques ont été incorporées et la méthodologie a été améliorée, par exemple par un meilleur contrôle de qualité des signaux afin d'identifier automatiquement les signaux large bandes saturés ou tiltés qui peuvent perturber fortement la détermination du mécanisme au foyer.

2) Développement d'une approche de révision complète de la localisation hypocentrale et du mécanisme au foyer de séismes choisis (→ solutions révisées manuellement, par contraste avec les solutions automatiques du point 1)

Nous avons développé une approche d'inversion non linéaire des temps d'arrivée des ondes P et S basée sur une exploration des paramètres latitude, longitude, et profondeur du foyer combinant une recherche sur grille et du recuit simulé. Les temps de trajets théoriques des ondes P et S, le temps origine du séisme, ainsi que l'erreur RMS d'ajustement des temps d'arrivée, sont calculés par le programme HYPOINVERSE 2000 (Klein, 2002). Considérant que le modèle de vitesse sismique est généralement mal connu, l'exploration des paramètres de la source est effectuée simultanément avec 81 modèles de vitesse différents, caractérisés par une croûte à gradient de vitesse linéaire où l'on fait varier la vitesse au sommet et celle à la base de la croûte, avec des rapports V_p/V_s variés. Finalement, toutes les solutions hypocentrales obtenues avec ces 81 modèles de vitesse sont visualisées sous forme de graphes représentant la latitude, la longitude, ou la profondeur, en fonction de l'erreur RMS (cf. exemple en Annexe).

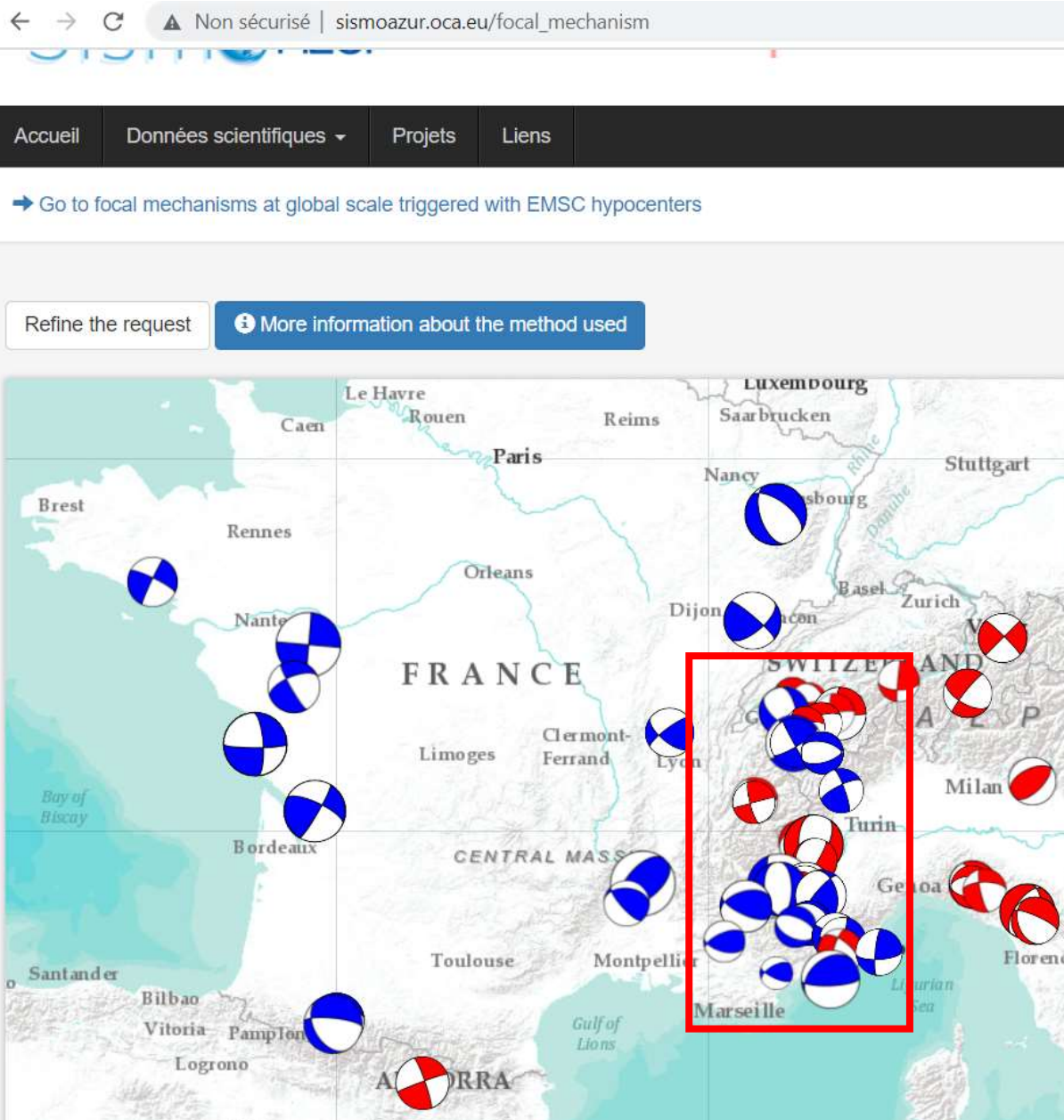
Cette approche permet une estimation plus réaliste des incertitudes sur la localisation hypocentrale, notamment la profondeur, qui tient compte de la méconnaissance que nous avons sur le modèle de vitesse. Par ailleurs, l'utilisation de modèles de vitesse à gradient linéaire pour la croûte permet d'obtenir des mécanismes au foyer plus stables que lorsque l'on travaille avec des modèles crustaux à couches homogènes.

Delouis, B., 2014. FMNEAR: determination of focal mechanism and first estimate of rupture directivity using near source records and a linear distribution of point sources, Bulletin of the Seismological Society of America, 104 (3),1479-1500. doi: 10.1785/0120130151

Klein, F. W., 2002. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes. USGS Open-File Report 2002-171, <https://doi.org/10.3133/ofr02171>. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr02171>

3) Mise en place d'une page web permettant de visualiser les mécanismes au foyer automatiques et révisés

http://sismoazur.oca.eu/focal_mechanism



Sur la carte ci-contre issue de la page web les mécanismes au foyer en rouge sont des solutions automatiques et ceux en bleus ont été révisés manuellement.

Les mécanismes les plus nombreux sont dans la zone ALCOTRA, mais certaines solutions obtenues pour d'autres régions sont également reportées sur la même page.

Sur la page, les paramètres précis des séismes sont accessibles en cliquant sur l'événement choisi, et le détail de la détermination des paramètres de la source, avec la modélisation des formes d'ondes, est visualisable sous forme graphique.

NB: la représentation graphique des résultats ayant évolué au cours des années, elle n'est pas présentée de manière totalement homogène d'un séisme à l'autre.

Dans quelques cas, un mécanismes à partir des polarités des ondes P est également disponible sur la page.

4) Echanges et comparaison des solutions mécanismes au foyer avec celles déterminées par UNIGE

Les mécanismes au foyer des événements traités en commun par CNRS-Géoazur et UNIGE-Arpa Piemont sont présentées et comparées.

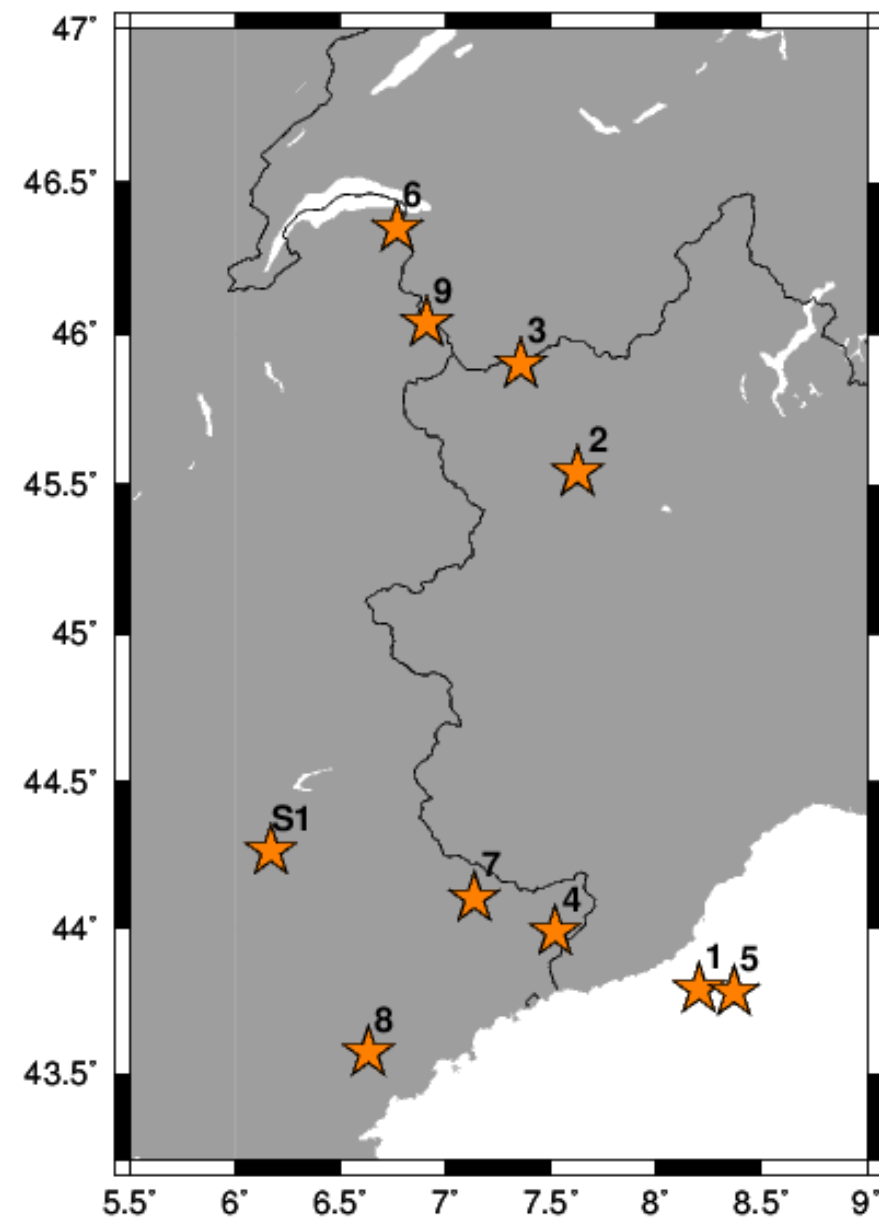
Un lot de mécanismes additionnels a été calculé par UNIGE sur la base de la liste d'événements fournie par Géoazur.

Globalement, on peut vérifier que les solutions déterminées par les deux organismes sont plutôt cohérentes, ce qui permet de considérer le catalogue de mécanisme au foyer avec un degré de confiance accru. Quelques différences ponctuelles sont également intéressantes à analyser et peuvent conduire à une ré-analyse pour confirmation.

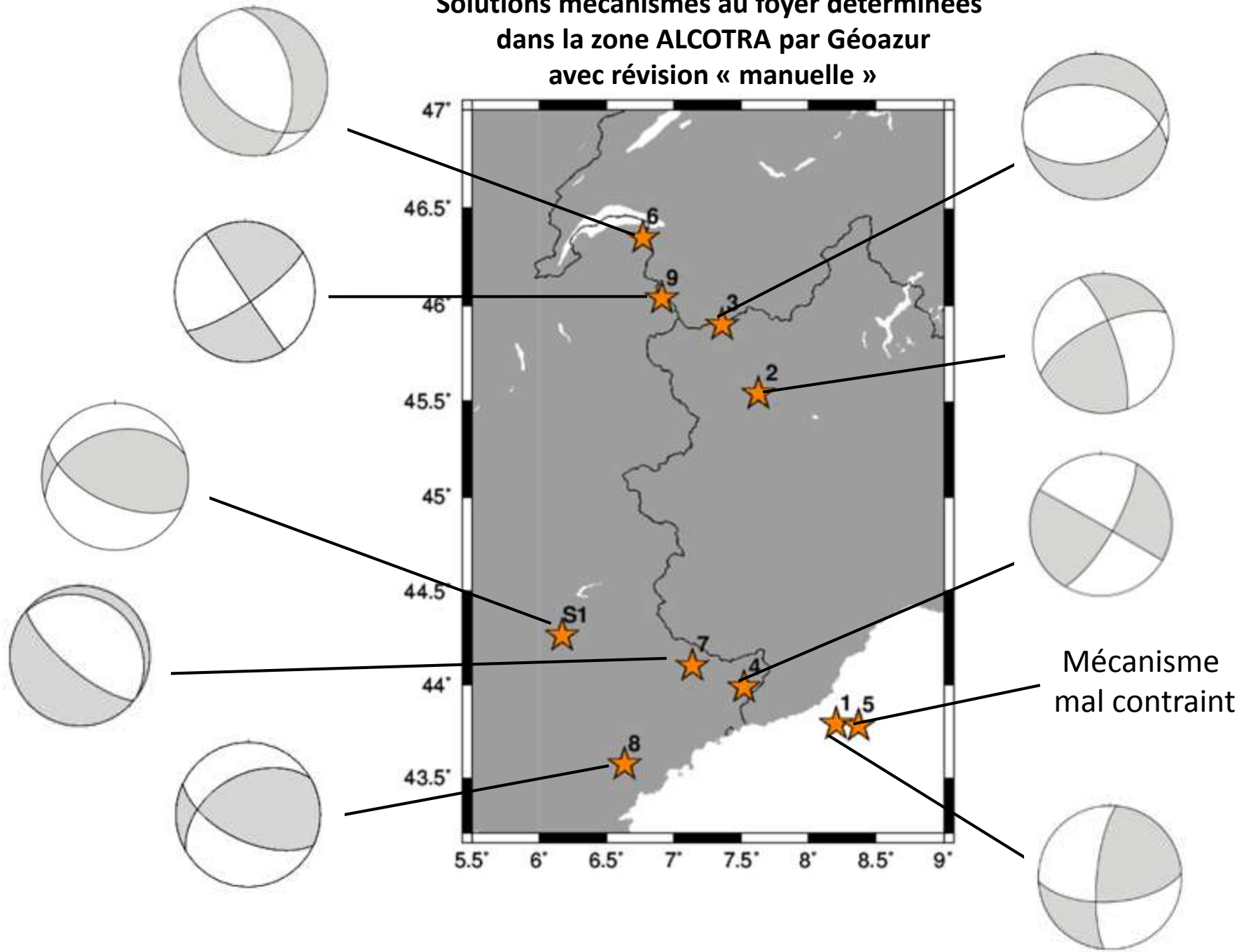
Evénements déterminés manuellement avec mécanismes au foyer à partir des polarités de l'onde P et inversion des formes d'ondes

#	Lat	Long	Date	Area	Mag
1	43.790	8.204	2010/07/04 16h34 (UTC)	Large Imperia	MI 3.7
2	45.540	7.627	2014/11/28 19h43 (UTC)	Piémont italien	MI 3.4
3	45.900	7.356	2015/06/15 03h14 (UTC)	Vallée d'Aoste	MI 3.2
4	43.987	7.520	2016/09/03 19h14 (UTC)	Vallée de la Roya	MI 3.9
5	43.781	8.371	2016/10/08 21h37 (UTC)	Large Imperia	MI 3.9
6	46.350	6.769	2019/05/28 08h48 (UTC)	Thonons-les-Bains	MI 4.2
7*	44.102	7.138	2020/05/02 12h57 (UTC)	Nord Alpes Maritimes	MI 3.4
8	43.571	6.635	2020/02/18 04h47 (UTC)	Var	MI 3.5
9	46.036	6.910	2020/06/23 06h25 (UTC)	Vallorcine	MI 3.8
* <i>mécanisme par polarités seulement</i>					
S1	44.263	6.170	2016/11/10 02h48 (UTC)	Nord-Est de Sisteron	MI 4.0

**Dates en couleur: événements déterminés à la fois par Géoazur
et UNIGE**



Solutions mécanismes au foyer déterminées
dans la zone ALCOTRA par Géoazur
avec révision « manuelle »

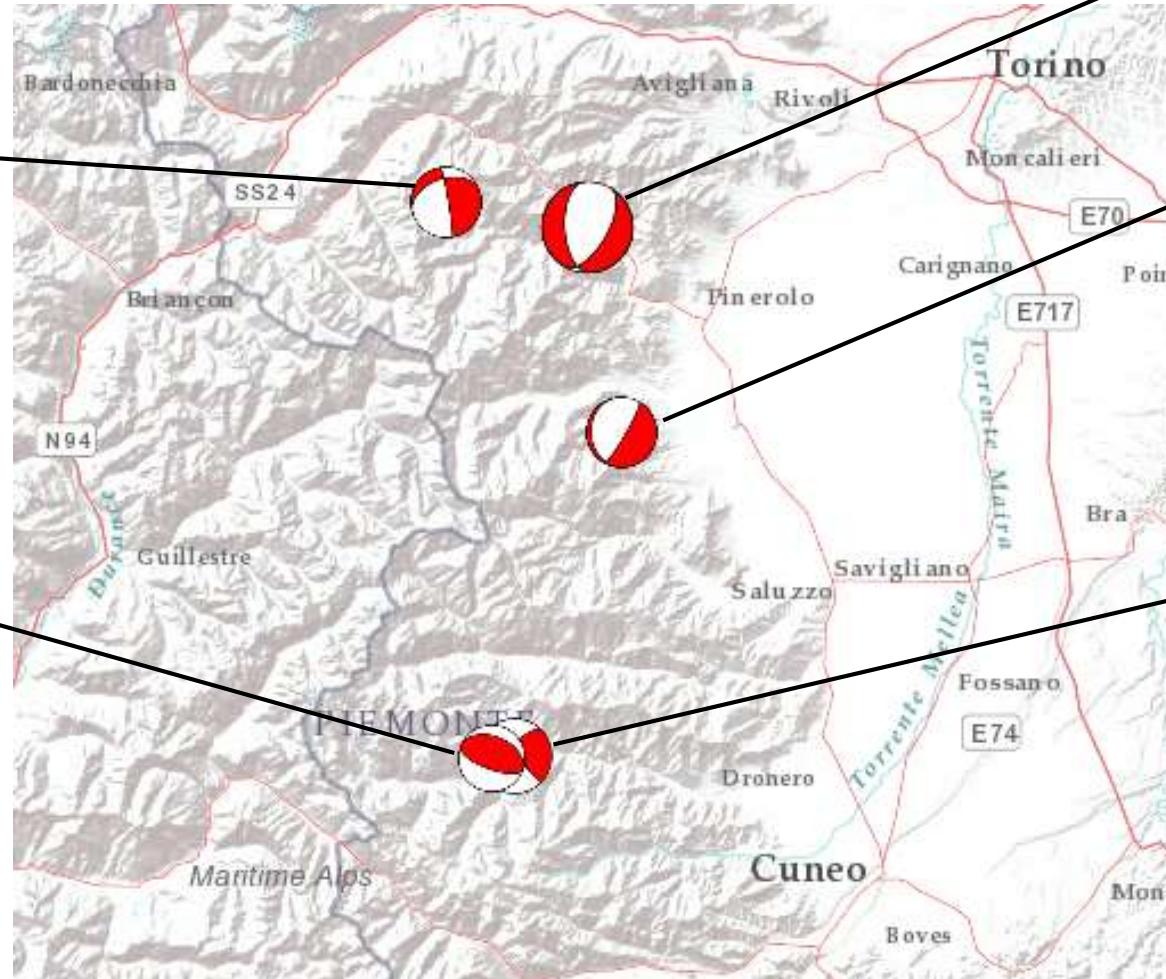


Mécanismes automatiques au niveau du Piémont italien (inversion des formes d'ondes FMNEAR)

http://sismoazur.oca.eu/focal_mechanism

Date and time (UTC)	2019-06-05 17:35:03
Magnitude	2.7 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	44.97 ° N 7.03 ° E 8 km
Strike Dip Rake	250 30 -12
Index Quality RMS	75% B 0.561

Date and time (UTC)	2018-08-03 01:21:46
Magnitude	3.1 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	44.49 ° N 7.08 ° E 10 km
Strike Dip Rake	110 60 88.7
Index Quality RMS	72% B 0.491



Date and time (UTC)	2016-07-30 20:21:38
Magnitude	3.7 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	44.95 ° N 7.20 ° E 7 km
Strike Dip Rake	30 50 -67.3
Index Quality RMS	82% A 0.485

Date and time (UTC)	2018-03-27 13:29:48
Magnitude	3.3 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	44.77 ° N 7.24 ° E 12 km
Strike Dip Rake	30 80 -83
Index Quality RMS	79% B 0.441

Date and time (UTC)	2018-07-17 18:13:44
Magnitude	3.2 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	44.50 ° N 7.11 ° E 7 km
Strike Dip Rake	135 90 157.2
Index Quality RMS	73% B 0.609

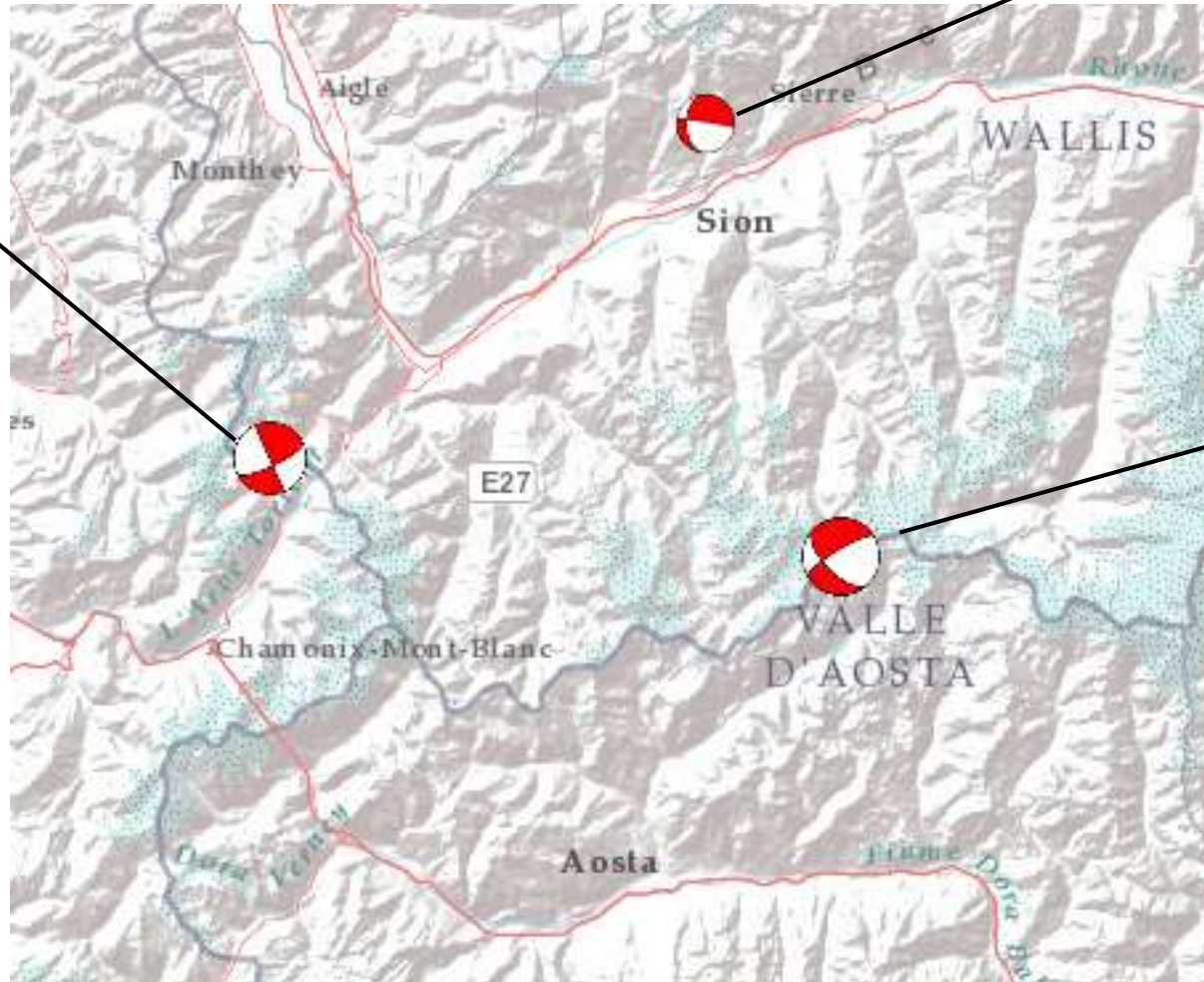
Détail de la modélisation des formes d'ondes disponible sur le lien web

Mécanismes automatiques au nord de la Vallée d'Aoste (inversion des formes d'ondes FMNEAR)

http://sismoazur.oca.eu/focal_mechanism_emsc

Date and time (UTC)	2020-10-15 00:21:58
Magnitude	2.5 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	46.28 ° N 7.37 ° E 6 km
Strike Dip Rake	180 30 -10
Index Quality RMS	75% B 0.68

Date and time (UTC)	2020-11-08 23:56:43
Magnitude	3.2 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	45.97 ° N 7.51 ° E 8 km
Strike Dip Rake	135 50 -21
Index Quality RMS	75% B 0.57



Date and time (UTC)	2020-06-23 06:25:41
Magnitude	3.0 Mw(fmnear)
Lat Lon Depth	46.04 ° N 6.92 ° E 5 km
Strike Dip Rake	65 70 178
Index Quality RMS	76% B 0.68

Détail de la modélisation des formes d'ondes disponible sur le lien web

Solutions transmises par UNIGE

long	lat	prof	Strike	dip	rake	mag	Date-time
8.593	44.036	7.9	140	75	60	3.40	20140403 1033 25.71
6.673	44.504	6.1	30	70	-90	4.92	20140407 1926 58.70
6.775	44.699	5.6	20	70	100	3.50	20140612 1146 47.95
6.672	44.508	6.0	20	50	-80	3.47	20140622 0132 14.03
7.211	44.498	6.3	0	20	120	3.71	20140713 1005 40.08 #low reliability STDR 0.42
6.654	44.503	7.4	20	40	-60	3.43	20140714 0309 23.94
9.449	44.568	8.4	0	65	-50	3.88	20141130 0934 25.29
9.041	44.904	11.0	220	80	0	3.77	20141206 1740 40.17
6.706	44.478	6.0	0	55	-100	4.00	20151106 0403 3.46
6.748	44.748	4.1	85	30	-70	3.33	20151231 2042 0.11
7.297	44.413	6.0	5	40	70	3.63	20160314 1336 11.15
7.221	44.937	8.5	60	75	-40	4.06	20160730 2021 38.46
7.517	43.989	8.0	130	60	-120	3.55	20160903 1914 53.62
8.338	43.837	9.8	85	80	-140	3.39	20161008 2137 19.67
7.579	46.343	8.7	75	65	140	4.00	20161024 1444 10.57
6.152	44.291	6.0	115	80	140	3.66	20161109 1535 10.42
6.165	44.302	8.0	130	70	140	4.00	20161110 0248 12.54
7.028	44.651	13.0	25	70	-110	3.14	20161111 0538 55.28
7.099	46.480	6.7	45	60	-100	4.05	20170701 0810 33.09 #multiple solution (chosen)
#7.099	46.480	6.7	70	45	-120	4.05	20170701 0810 33.09 #multiple solution (discarded)
7.270	44.274	11.6	10	75	-20	3.20	20170408 0952 34.08
6.357	45.438	10.8	135	45	-80	3.41	20171025 0341 16.79 #uncertainty on strike dip rake
but good STDR (0.78). No down							
6.352	45.436	9.7	135	35	-80	3.45	20171027 0109 50.16 #uncertainty on strike dip rake
but good STDR (0.83). No down							
7.099	44.500	6.6	65	70	50	3.63	20180717 1813 44.91

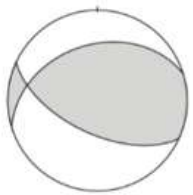
Comparaison des solution Géoazur et UNIGE pour les événements communs

Solutions Géoazur en dehors du cadre

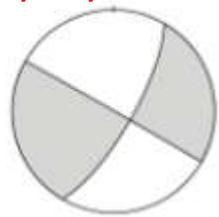
20140407 19h26



2016/11/10 02h48

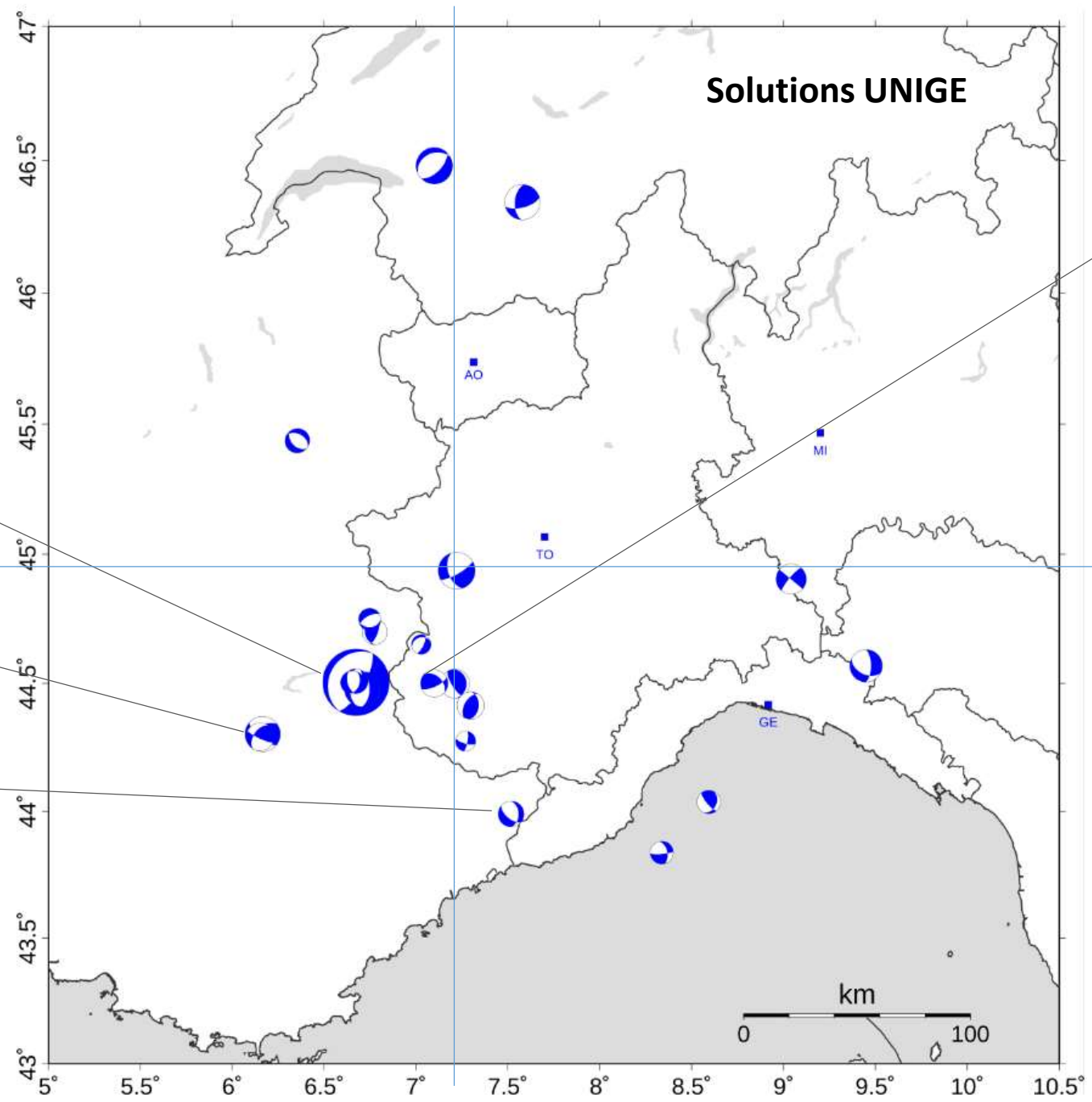
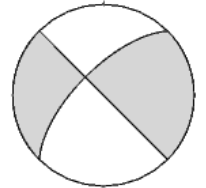


2016/09/03 19h14



Solutions UNIGE

20180717
18h13



Solutions additionnelles UNIGE pour comparaison

20100704 16:24 55.44
43 50.45 8 10.20
DEPTH = 6.00 KM
MAG = 0.00

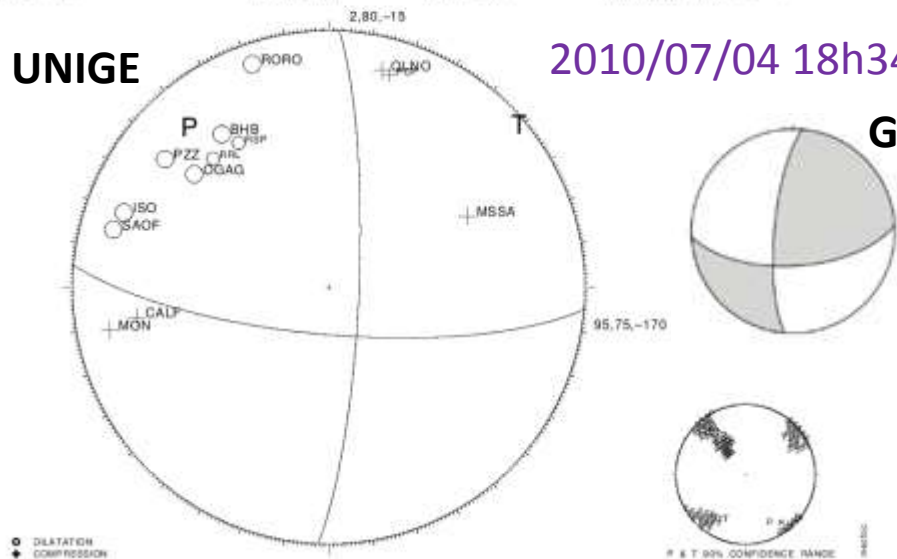
RMS = 0.26 S
DMN = 31 KM
AZM GAP = 171
FM = 13
ERH = 0.8 KM
ERZ = 0.9 KM
MISFIT = 0.00 (+.05)
STDR = 0.77

STRIKE UNCERTAINTY = 5
DIP UNCERTAINTY = 13
RAKE UNCERTAINTY = 35
% MACHINE PICKS = 0

UNIGE

2010/07/04 18h34

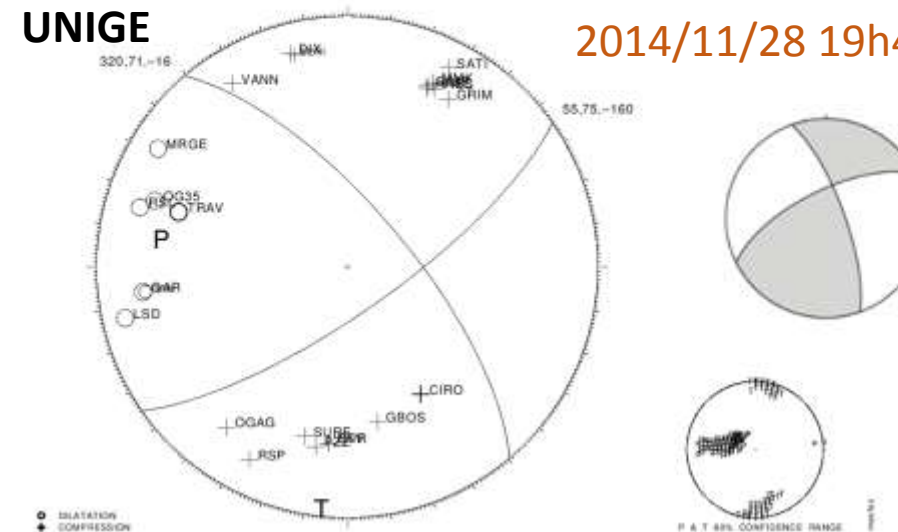
Géoazur



UNIGE

2014/11/28 19h43

Géoazur



20150615 03:14 45.99
45 54.59 7 21.36
DEPTH = 12.15 KM
MAG = 0.00

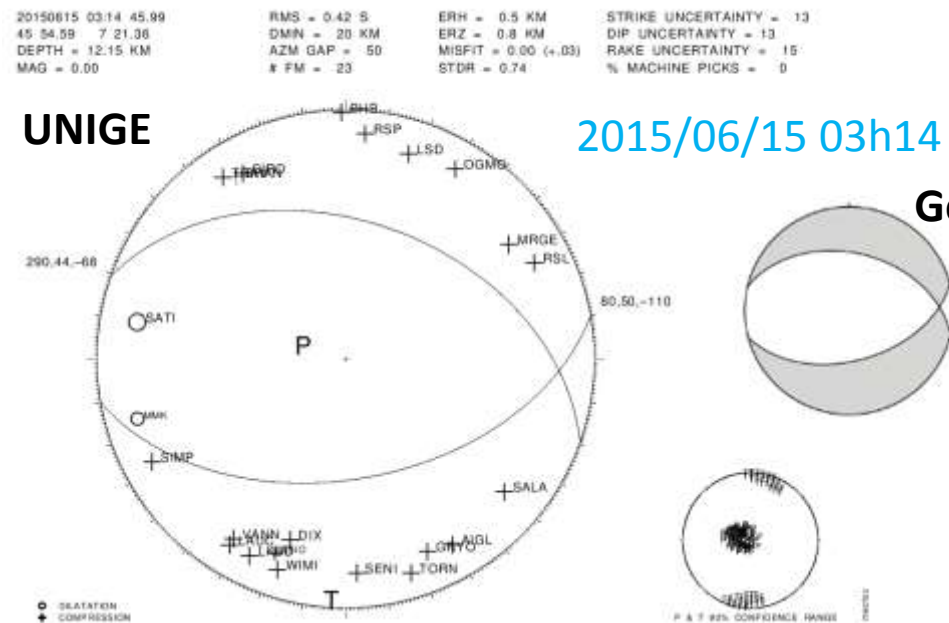
RMS = 0.42 S
DMN = 20 KM
AZM GAP = 50
FM = 23
ERH = 0.5 KM
ERZ = 0.8 KM
MISFIT = 0.00 (+.03)
STDR = 0.74

STRIKE UNCERTAINTY = 13
DIP UNCERTAINTY = 13
RAKE UNCERTAINTY = 15
% MACHINE PICKS = 0

UNIGE

2015/06/15 03h14

Géoazur



20190528 08:48 4.72
46 22.25 6 46.43
DEPTH = 7.55 KM
MAG = 0.00

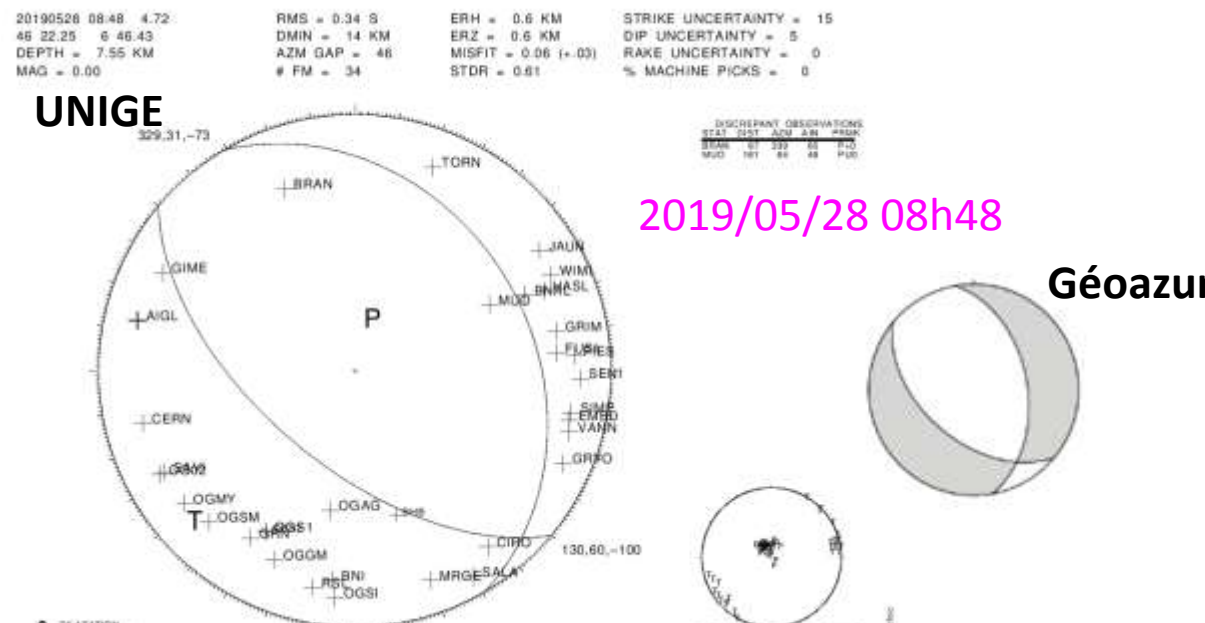
RMS = 0.34 S
DMN = 14 KM
AZM GAP = 46
FM = 34
ERH = 0.6 KM
ERZ = 0.6 KM
MISFIT = 0.06 (+.03)
STDR = 0.61

STRIKE UNCERTAINTY = 15
DIP UNCERTAINTY = 5
RAKE UNCERTAINTY = 0
% MACHINE PICKS = 0

UNIGE

2019/05/28 08h48

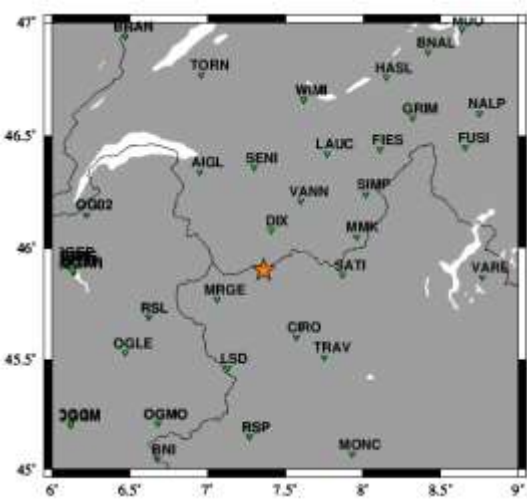
Géoazur



ANNEXE

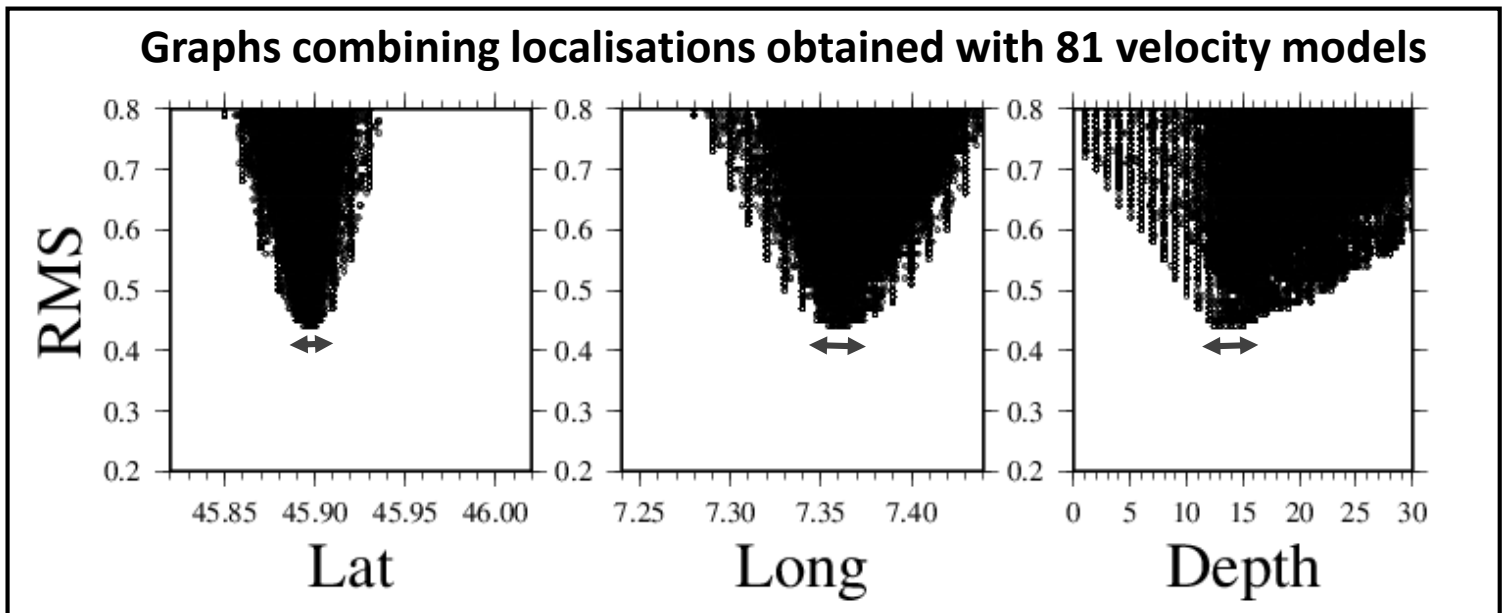
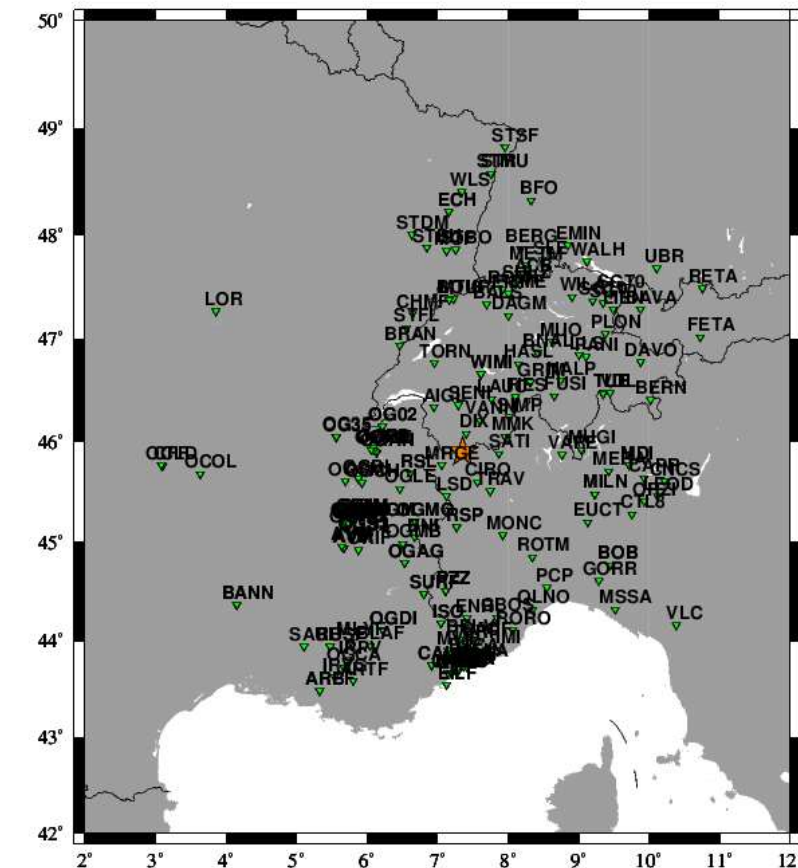
**Illustration de la méthodologie développée pour l'analyse fine d'un séisme individuel
« révision manuelle »**

2015/06/15 03h14 (UTC) Vallée d'Aoste MI 3.2



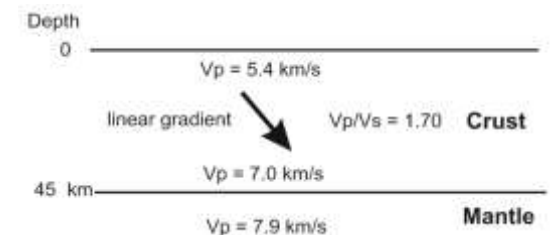
**Inversion of P and S arrival times for lat, long, depth, and T0 combining a grid search, simulated annealing, and HYPOINVERSE-2000 (Klein, 2002), testing a series of velocity models with varying velocity gradient (Vp_top and Vp_base in the crust), Moho depth (45, 50, 55 km), and the Vp/Vs ratio (1.70, 1.73, 1.76)
Vp mantle fixed to 7.9 km/s**

**Weighted phases retained:
37 P + 30 S**



Best solution found:

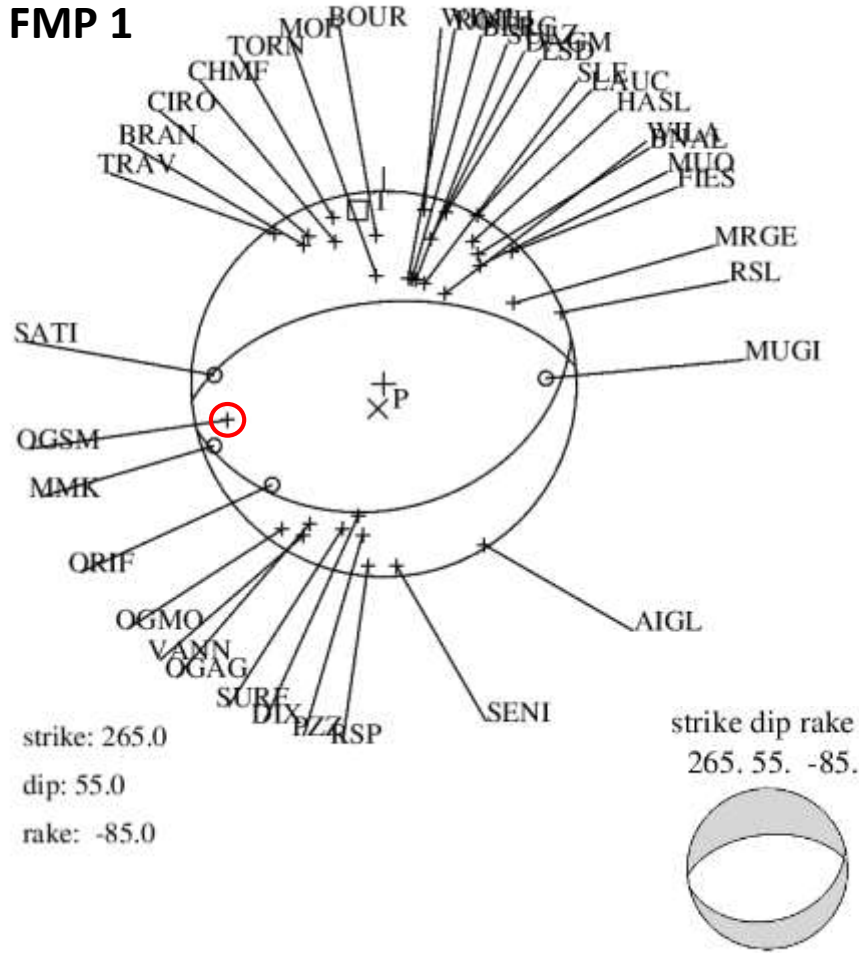
Lat: 45.900 Lon: 7.356 Depth: 12 km
 T0: 46.1s RMS_{LOC}: 0.44s
 Vp_top, Vp_base, depth_moho
 5.40 km/s 7.00 km/s 45.0 km
 best Vp/Vs= 1.70



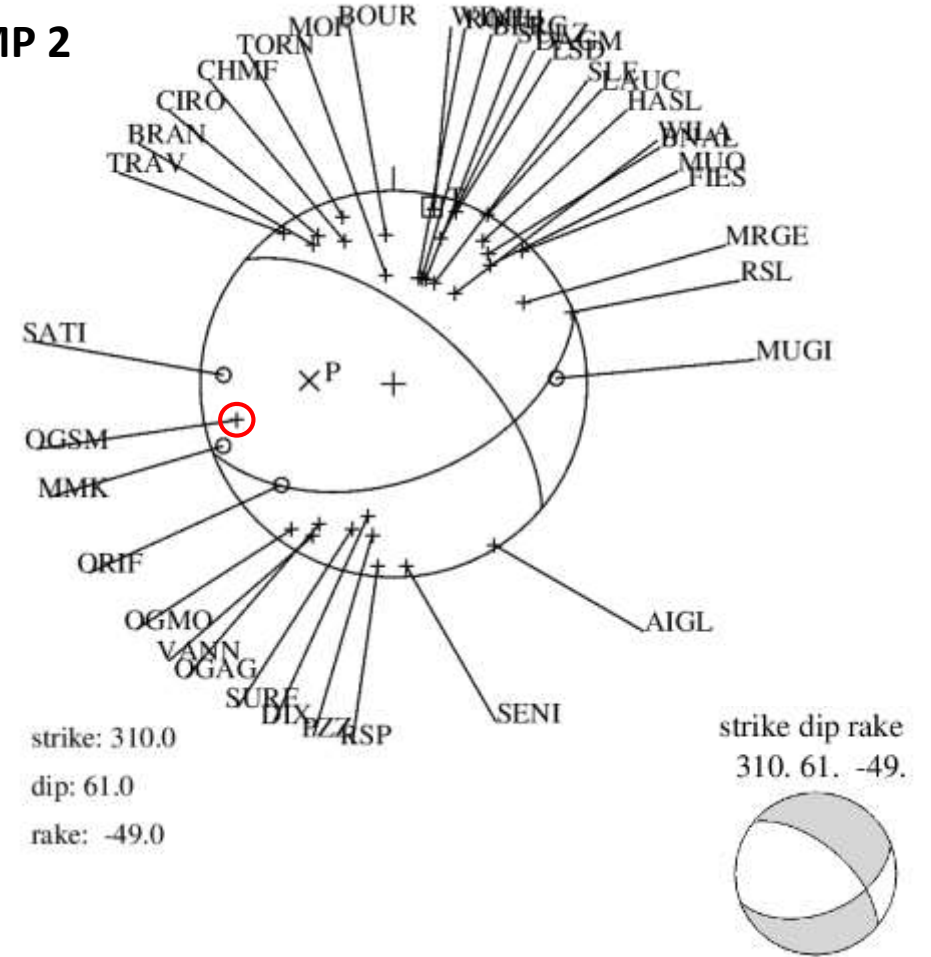
Focal mechanism from P first motions

With the best depth found, **12 km** ($RMS_{loc} = 0.44$)

Sol FMP 1



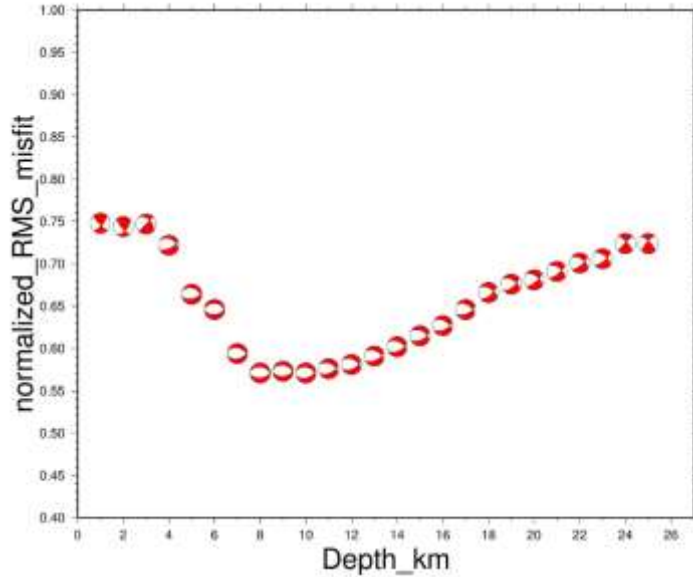
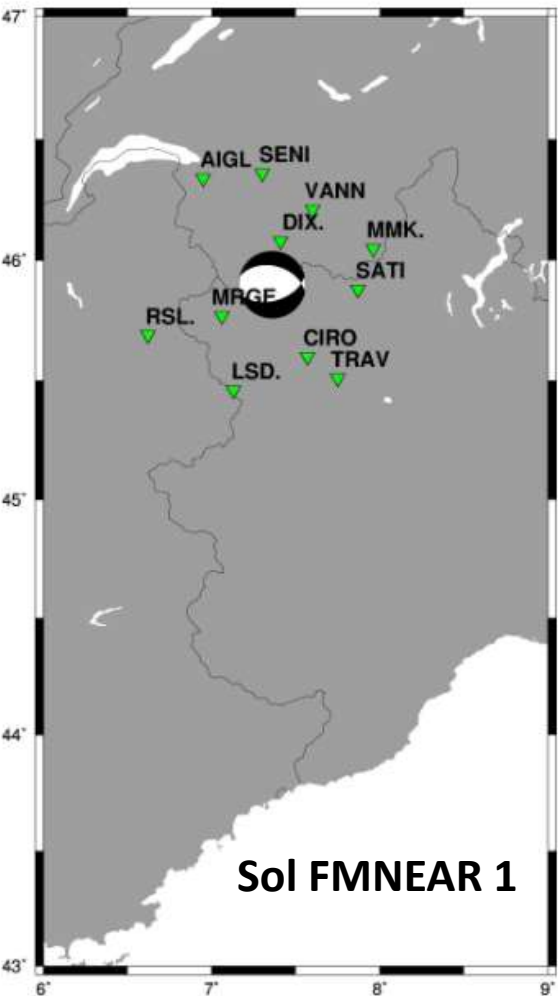
Sol FMP 2



+ : first motion in compression (Zup) o : first motion in dilatation (Z down) ○ : polarity in disagreement with the FM

Focal mechanism from waveform inversion (FMNEAR)

Standard velocity model
from routine FMNEAR inversions



strike dip rake
75.0 50.0 -109.2 : best focal mechanism

RMS = 0.571

Selected depth: 10.0 km

33 = number of components with freqband > 0.015Hz
77 % : index of confidence

2.87 : Mw from waveform inversion

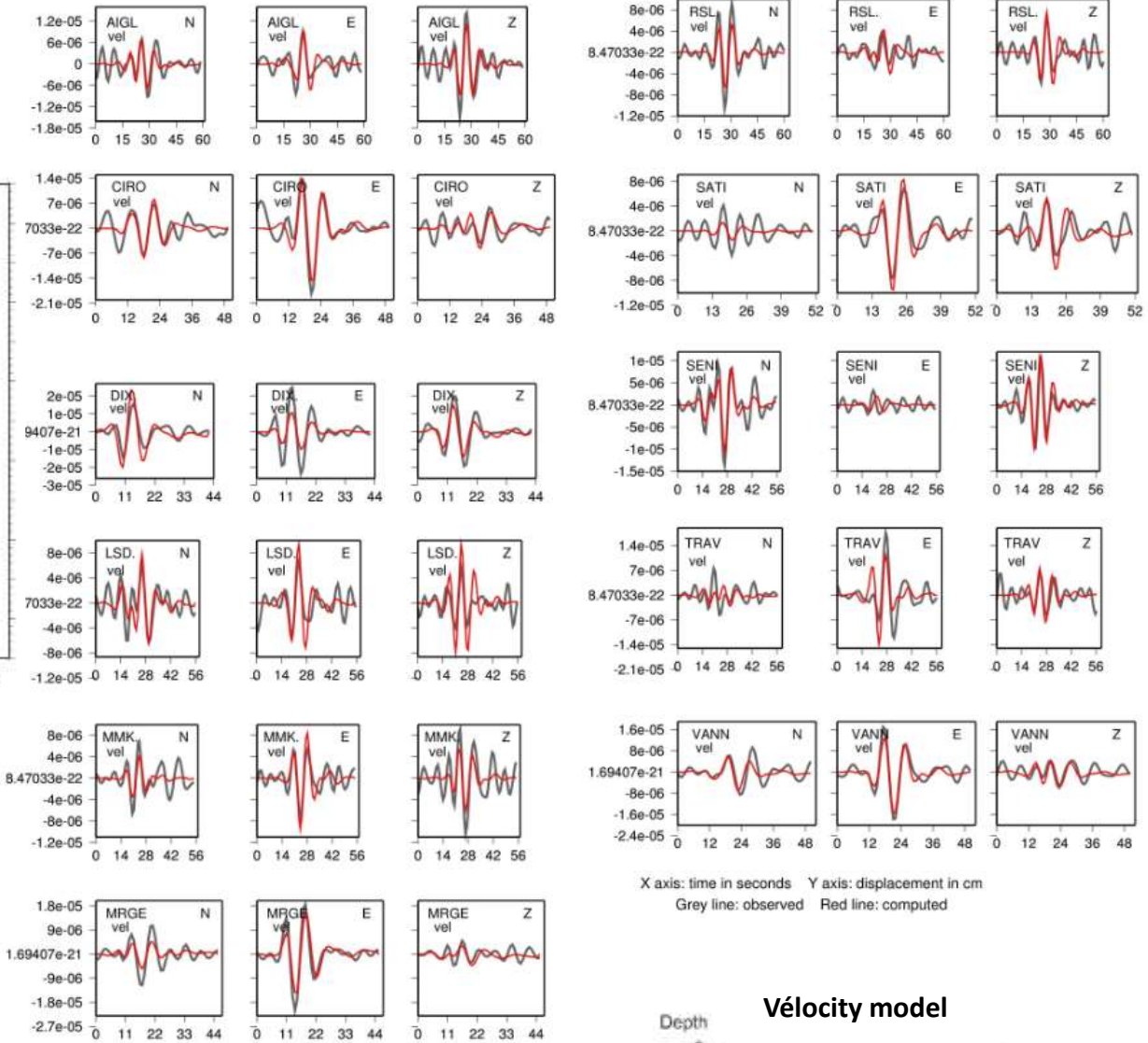
Epicenter used (lat, long): 45.900 7.356
Starting depth(km): 10.0

strike dip rake of the second nodal plane:
283.4 43.7 -68.6

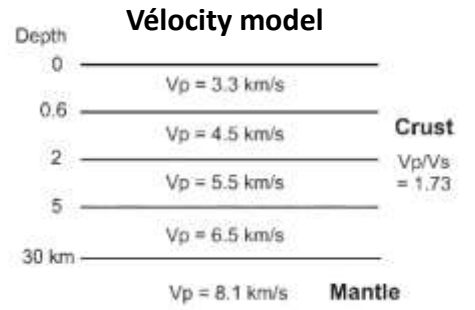
***** quality: B *****

**** Signification of quality ****

A: focal mechanism STRONGLY CONSTRAINED
B: focal mechanism WELL CONSTRAINED
C: focal mechanism MODERATELY CONSTRAINED
D: focal mechanism WEAKLY CONSTRAINED
E: focal mechanism BARELY CONSTRAINED
F: focal mechanism NOT CONSTRAINED

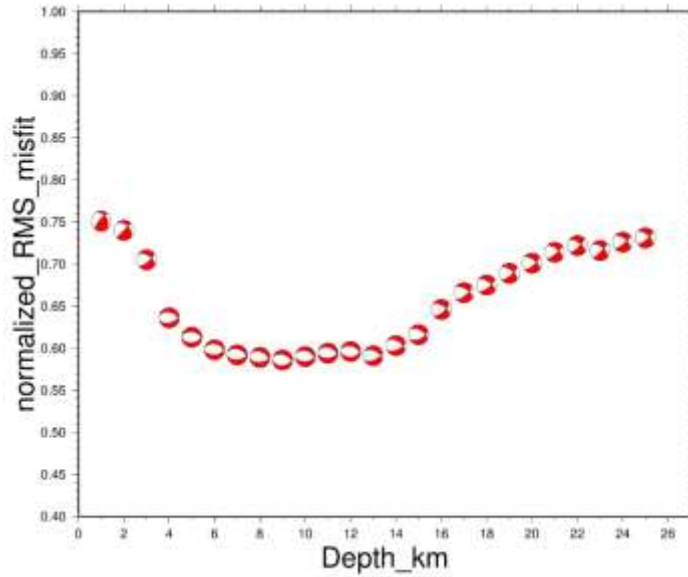
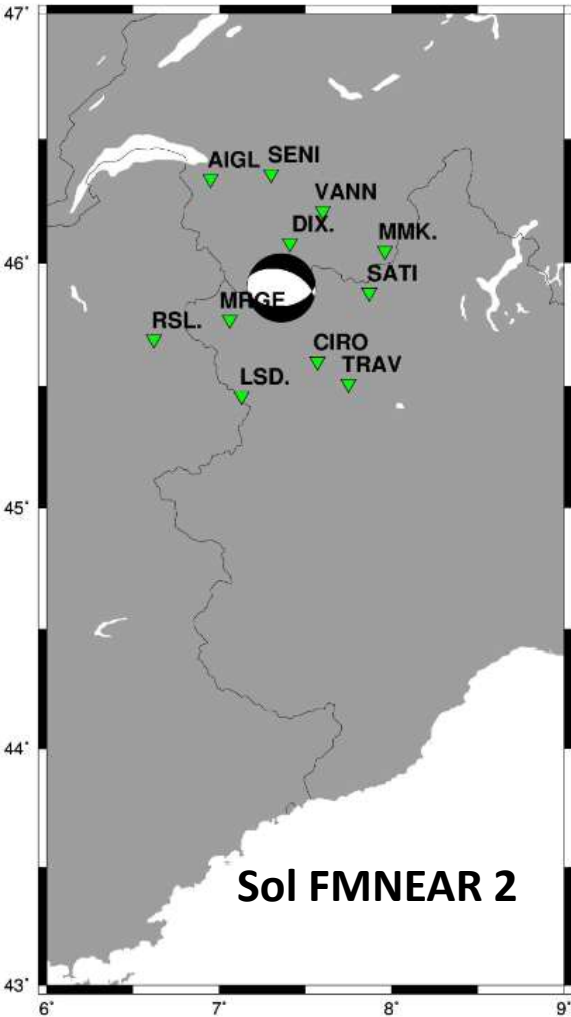


X axis: time in seconds Y axis: displacement in cm
Grey line: observed Red line: computed



Focal mechanism from waveform inversion (FMNEAR)

**Specific velocity model
close to the gradient model found**



strike dip rake
85.0 45.0 -106.5 : best focal mechanism

RMS = 0.586

Selected depth: 9.0 km

33 = number of components with freqband > 0.015Hz
71 % : index of confidence

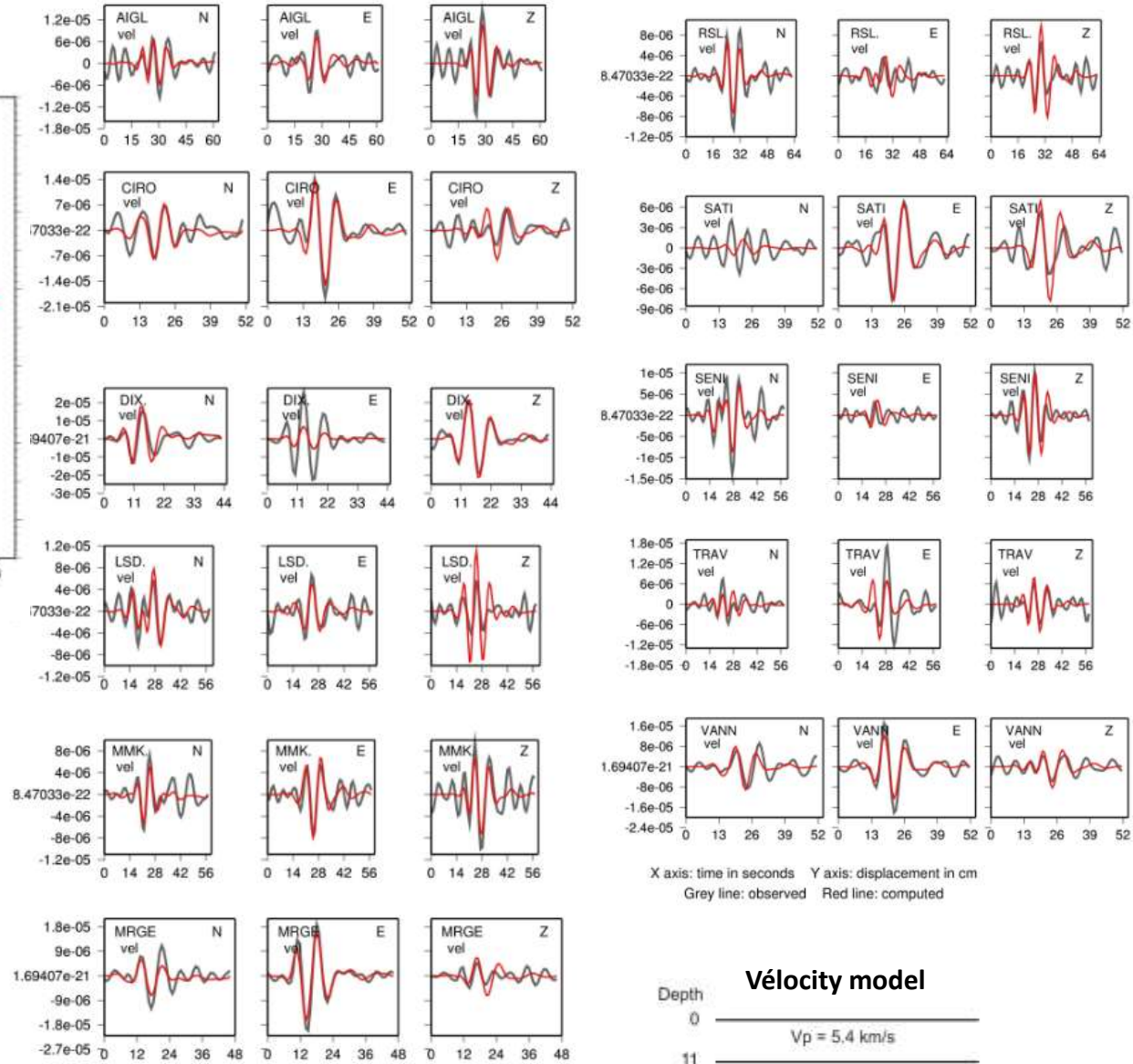
2.95 : Mw from waveform inversion

Epicenter used (lat, long): 45.900 7.356
Starting depth(km): 9.0

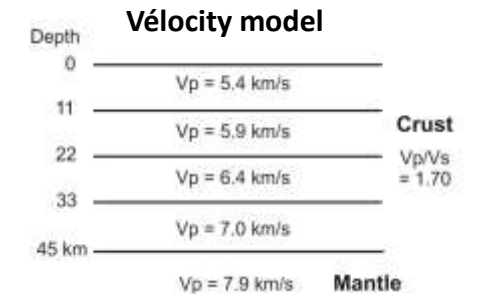
strike dip rake of the second nodal plane:
287.7 47.3 -74.1

***** quality: C *****

**** Signification of quality ****
A: focal mechanism STRONGLY CONSTRAINED
B: focal mechanism WELL CONSTRAINED
C: focal mechanism MODERATELY CONSTRAINED
D: focal mechanism WEAKLY CONSTRAINED
E: focal mechanism BARELY CONSTRAINED
F: focal mechanism NOT CONSTRAINED



X axis: time in seconds Y axis: displacement in cm
Grey line: observed Red line: computed



Conclusion pour 2015/06/15 03h14 (UTC) Vallée d'Aoste MI 3.2

Profondeur hypocentrale:

- 11-16 km par inversions des T_p , T_s
- 8-13 km par FMNEAR

Profondeur commune: 11 à 13 km

Mécanisme au foyer:

Sol FMP 1 par polarités et solutions FMNEAR très proches

→ Mécanisme considéré comme bien contraint

Mw: 2.9

Solution retenue:

strike dip rake
75. 50. -109.

