



Programme opérationnel Interreg IVA
France-Espagne-Andorre 2007 – 2013



SISPYR

Sistema de Información Sísmica del Pirineo
Systeme d'Information Sismique des Pyrénées
Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus

Etude des sources sismiques
Catalogue et tenseurs de moments automatiques
Action 3.1



Instituto
Geográfico Nacional



Contributeur principal : OMP

2013-04-17



Auteurs : Sébastien Chevrot (2), Tanit Frontera (1), Anne Lemoine (5)

Mots-clés :

Événement sismique, Pyrénées, France, Espagne, Andorre, SISPYR

-
1. IGC, Institut Geològic de Catalunya
 2. OMP, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées
 3. UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
 4. IGN, Instituto Geografico Nacional
 5. BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières
 6. GEOCAT
 7. CSIC-IJA, Consejo Superior de Investigaciones Científicas – Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera

© 2013 SISPYR project



Table des matières

<u>Introduction</u>	p. 4
<u>I Création de la base données SISPYR</u>	p. 5
<u>II Tenseurs et magnitudes de moment</u>	p. 6
<u>III Benchmark des différentes méthodes d'inversion (workshop du 12/11/2010)</u>	p. 7
<u>IV Catalogue de tenseurs des moments</u>	p. 9
<u>V Inversion temps réel</u>	p. 12
<u>Conclusions</u>	p. 13
<u>Annexes</u>	



Introduction

La détermination rapide des mécanismes au foyer et des magnitudes des séismes est importante pour l'évaluation des risques associés aux répliques après le choc principal, pour l'éventuelle coordination des opérations de secours, ainsi que pour la diffusion d'une information rapide et fiable envers le public. Du fait de l'hétérogénéité des réseaux sismiques et du nombre limité de stations large bande, les paramètres à la source (mécanismes au foyer, magnitude) des séismes pyrénéens n'étaient pas réalisés de façon systématique avant le projet SISPYR. De ce fait, il n'existait pas de catalogue systématique de mécanismes au foyer pour les séismes de taille modérée ($M > 3$) pour les Pyrénées. Les quelques données disponibles étaient spatialement très hétérogènes, et avaient souvent été réalisées dans le cadre d'étude de crises sismiques, sans véritable continuité temporelle.



1 Création de la base de données SISPYR

Le premier travail qui a été réalisé dans le cadre de l'action sur les sources sismiques a été de créer une base de données compilant l'ensemble des enregistrements réalisés par l'intégralité des stations sismologiques dans les Pyrénées appartenant aux différents organismes (OMP, IGN, IGC, RAP, BRGM). Cette base de données comprend 140 séismes, ayant eu lieu entre 2001 et 2010. Cette mise en commun des données sismologiques, réalisée pour la première fois dans le cadre du projet SISPYR, a été un point clé pour la réalisation de différentes actions, notamment l'étude des sources sismiques.



2 Tenseurs et magnitudes de moment

La magnitude de moment offre une échelle de magnitude qui ne sature pas pour les gros séismes. En outre, comme elle est directement reliée aux paramètres à la source, elle donne une estimation de la magnitude plus robuste et non dépendante de relations empiriques reliant l'amplitude des ondes observées à la distance, telles que celles utilisées habituellement pour déterminer les magnitudes locales. Pour les Pyrénées, où différents organismes produisent des bulletins sismiques, l'obtention de catalogues homogènes est une étape importante dans l'estimation de l'aléa sismique.

La quantification des séismes de forte magnitude ($M > 5.5$) par inversion de tenseurs de moment est réalisée de façon routinière par différents organismes. Par exemple, les solutions Global CMT (Centroid Moment Tensor – <http://www.globalcmt.org>) sont disponibles rapidement (en quelques heures) via internet (e.g. Ekstrom et al, 2013). Des efforts similaires ont été réalisés récemment pour l'étude de la sismicité régionale, par exemple en Californie (Romanowicz et al., 1993). En Europe, ces méthodes ont également donné de bons résultats par exemple en Suisse pour les séismes de magnitude supérieure à 3.5 mais elles ne sont généralement appliquées de façon systématique qu'aux séismes de forte magnitude (Braunmiller et al., 1994).

Nous souhaitons adapter aux Pyrénées ces méthodes d'inversion de forme d'onde pour les tenseurs de moment, en nous appuyant sur l'expérience qui a pu être accumulée dans d'autres régions du monde. L'objectif était de développer des méthodes robustes, rapides en vue d'être automatisées en vue du passage au temps réel.



3 Benchmark des différentes méthodes d'inversion du tenseur des moments (workshop du 12/11/2010)

Les événements de la base de données SISPyr ont été utilisés pour tester différentes méthodes d'inversion du tenseur des moments. Les résultats obtenus par les différents participants ont été analysés et comparés au cours d'un workshop organisé à Barcelone par l'IGC, le 12 novembre 2010.

Les participants appartenant au projet SISPyr étaient : Sébastien Chevrot (OMP), Tànit Frontera (IGC), Xavier Goula (IGC), Anne Lemoine (BRGM), Eduard Nus (IGC), Carme Olivera (IGC) et Teresa Susagna (IGC) auxquels se sont joints deux chercheurs invités : Simone Cesca (Universität Hamburg, Germany) et Bertrand Delouis (Géoazur-Université de Nice, France), deux experts reconnus dans le domaine de l'inversion de source sismique.

Nous donnons ici une version très synthétique des conclusions de ce workshop. Le rapport complet est fourni en annexe.

3.1 Description

Deux événements tests ont été retenus pour comparer les résultats des différentes méthodes employées par les différents groupes.

Événement	Origine	Temps	Latitude	Longitude	Profondeur	Institut
040921	2004/09/21	15:48:04.78	42.336 N	2.147 E	3.6 ± 0.8	OMP
100401	2010/04/01	01:36:39.85	42.973N	0.319 E	14 ± 3	OMP

Les magnitudes calculées par les différents organismes pour ces deux événements

Événement	LDG	IGN	IGC	OMP	RéNass
040921	5.1 (MI)	4.3 (Mw)	4.0 (MI)	4.8 (MI)	4.8 (MI)
100401	4.3 (MI)	3.9 (MbLg)	4.2 (MI)	4.3 (MI)	4.3 (MI)

montrent une variabilité importante, en particulier pour le premier événement. Ceci montre déjà très clairement l'intérêt de revoir les estimations de magnitude, pour une plus grande homogénéité des différents catalogues.

Le modèle de vitesse 1-D utilisé dans les inversions est le modèle défini par l'OMP pour la localisation routinière de la sismicité pyrénéenne.

Profondeur	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Densité	Qp	Qs
0 – 1	5.5	3.1	2.50	500	250
1 – 4	5.6	3.2	2.53	520	260
4 – 11	6.1	3.5	2.70	600	300
11 – 34	6.4	3.7	2.80	650	375
> 34	8.0	4.6	3.30	1000	500

Chaque participant devait estimer le moment sismique M_0 , la magnitude de moment M_w , ainsi que le mécanisme au foyer pour chaque événement en utilisant toutes les données disponibles (enregistrements courte période, large bande et accélérométriques).



3.2 Résultats

Les résultats complets obtenus par les différents groupes sont les suivants, pour des tenseurs des moments de type double-couple.

Simone Cesca

Événement	Strike	Dip	Rake	Profondeur	Mw
040921	161	47	-50	5.6	4.30
100401	167	38	-22	21.1	3.60

Bertrand Delouis

Événement	Strike	Dip	Rake	Profondeur	Mw
040921	180	75	-43	5.0	4.30
100401	180	45	-63	15.0	3.45

Sébastien Chevrot

Événement	Strike	Dip	Rake	Profondeur	Mw
040921	155	75	-80	6.0	4.05
100401	105	25	-95	13.0	3.89

3.3 Conclusions

La variabilité des résultats obtenus vient de différences importantes dans les méthodes employées. En particulier, l'utilisation de données accélérométriques implique d'intégrer deux fois les enregistrements pour obtenir le déplacement, une procédure qui peut être instable sur certaines données. La bande de fréquence utilisée a également une importance cruciale. Si les formes d'onde à basse fréquence sont simples et permettent d'obtenir des résultats robustes, l'analyse des petits séismes ($M_w < 4$) suppose d'utiliser des période comprises typiquement entre 3 et 10 s, pour lesquelles les effets de propagation peuvent être importants, ce qui peut biaiser les résultats de l'inversion. Pour les "gros" événements ($M_w > 4$), les solutions obtenues sont stables, avec une magnitude de moment bien définie. Par contre pour les événements plus petits, la variabilité observée pour la magnitude peut être beaucoup plus importante.



4 Catalogue des tenseurs de moment

Un catalogue de tenseurs des moments préliminaire a été établi, en exploitant la base de données SISPYR. Il couvre pour l'instant la période 2001-2011. Nous avons obtenu des solutions stables pour 22 séismes ayant une magnitude locale supérieure à 3.8. La figure 1 montre une carte des mécanismes au foyer obtenus par inversion de forme d'onde. Ce catalogue est homogène, puisqu'il a été obtenu en utilisant la même méthode d'inversion pour tous les événements.

Ces mécanismes au foyer montrent que les séismes se sont produits sur des failles normales. Ils sont tous compatibles avec une direction principale d'extension à peu près Nord-Sud. C'est un résultat très important qui nous donne une information de première ordre sur la dynamique actuelle de la chaîne.

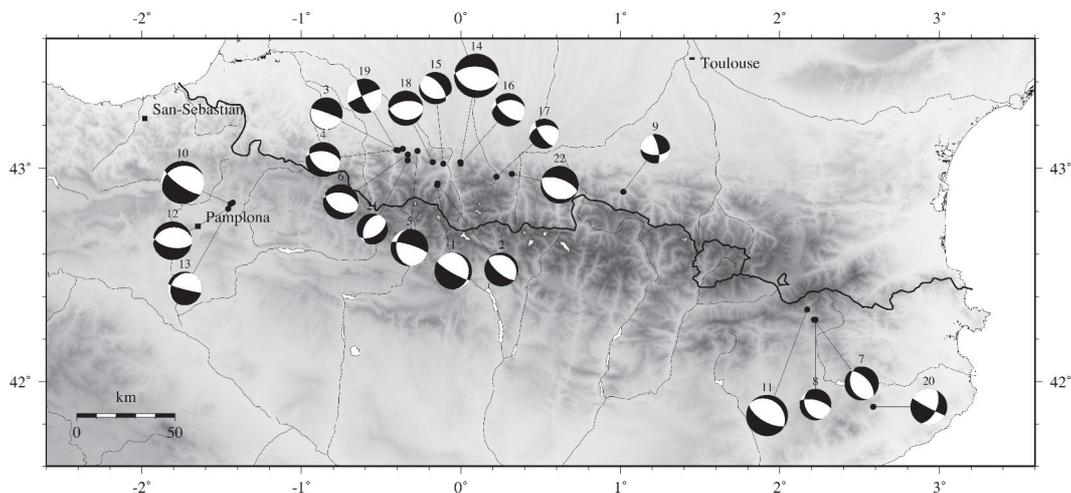


Figure 1 : carte des mécanismes au foyer obtenus en exploitant la base de données SISPYR. Le diamètre des sphères focales est proportionnel à la magnitude.

Le catalogue de tenseur des moments a également permis de calibrer les échelles de magnitude habituellement utilisées pour quantifier les tremblements de terre dans les Pyrénées, qui reposent sur des relations empiriques reliant l'amplitude des ondes S observées à la distance épacentrale. La figure 2 montre ainsi la relation entre la magnitude locale reportée par l'Observatoire Midi-Pyrénées et la magnitude de moment obtenue par inversion de forme d'onde. Cette dernière quantité est directement reliée aux paramètres physiques de la source comme la surface du plan de faille qui a glissé et l'amplitude du glissement. La relation obtenue :

$$M_w = 1.09 M_l(\text{OMP}) - 1.11$$

montre clairement que les échelles habituellement utilisées en France surestiment les magnitudes, de près d'une unité.

Ces résultats devraient contribuer de façon très significative à la construction d'une nouvelle échelle de magnitude pour les Pyrénées.

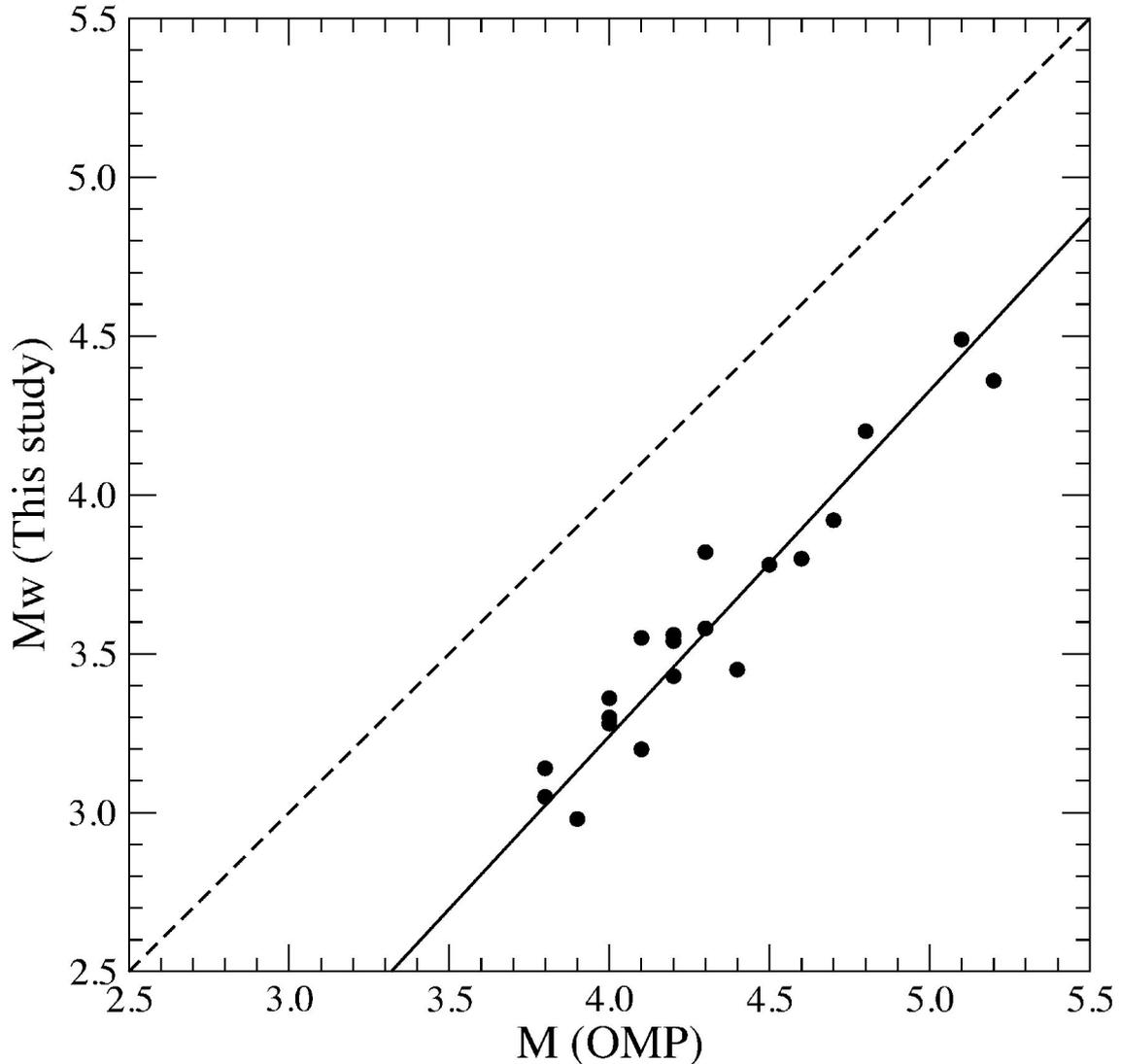


Figure 2 : Comparaison entre les magnitudes de moment M_w obtenues par inversion de forme d'onde et les magnitudes locales déterminées à l'Observatoire Midi Pyrénées

Cette étude a démontré la possibilité de déterminer les paramètres à la source en champ proche à partir des données accélérométriques pour des événements de magnitude supérieure à 3, au moins dans certaines régions des Pyrénées. Elle a également clairement montré que pour les petits séismes deux difficultés principales limitent cette approche. D'une part les petits séismes sont enregistrés par moins de stations car leur amplitude et donc le rapport signal à bruit décroît très rapidement avec la distance épacentrale. D'autre part, comme les petits séismes excitent très peu les basses fréquences, il faut inverser des formes d'onde à haute fréquence, pour lesquelles les effets liés à la propagation deviennent importants. En particulier, les variations de vitesse dans la croûte supérieure ont une signature importante sur les formes d'onde. Si la densification des réseaux large bande devrait permettre de résoudre en grande partie le problème de couverture spatiale, la caractérisation des séismes de taille modérée nécessite d'améliorer notre connaissance des structures crustales, d'où l'importance d'améliorer notre connaissance des vitesses sismiques



dans la croûte (voir action 3.2). Ces méthodes d'inversion des tenseurs de moment à partir des formes d'onde seront appliquées et valorisées de façon à obtenir une information rapide et semi-automatique des paramètres de la source, nécessaire pour une **évaluation rapide des mouvements de surface générés par un séisme**.

Ce catalogue de tenseurs des moments a été publié dans la revue Tectonophysics (Chevrot et al., 2011). La méthode permettant de calculer ces tenseurs est décrite dans le même article.



5 Inversion automatique en temps réel des tenseurs de moment

L'IGC dispose d'un système de localisation automatique en temps réel basé sur Earthworm (USGS, 2005) et d'un système manuel spécialement adapté aux besoins de l'IGC. L'implantation de l'inversion du tenseur de moment va se faire par une interface entre les programmes d'inversion développés par B. Delouis (GeoAzur, Université de Nice), qui ont déjà été testés, et les systèmes automatique et manuel de l'IGC.

Pour obtenir des résultats rapides et à la fois robustes, il faut ajuster les paramètres de l'inversion aux conditions spécifiques du réseau et des caractéristiques des séismes de la région. Cette adaptation aux systèmes en temps réel de l'IGC est actuellement à l'étude. Les tenseurs de moment des séismes $M_I \geq 4$ de la base de données SISPyT ont été calculés et les paramètres résultants des calculs sont en train d'être analysés (Table 1). Les magnitudes, nombres maximal et minimal de stations, distances épicentrales maximale et minimale, entre autres, sont des éléments à configurer sur l'interface pour l'optimisation des outils disponibles. Il est aussi planifié de réaliser des tests avec des données provenant des localisations automatiques.



Conclusions

Les actions menées sur les sources sismiques ont permis des avancées très importantes dans la caractérisation, la quantification, et la compréhension des séismes dans les Pyrénées. La version préliminaire du catalogue de tenseurs des moments, qui couvre la période 2001-2012, a fait l'objet d'une publication scientifique de rang A dans le journal "Tectonophysics" (cf documents annexes).

References

- Braunmiller, J. et al., Source mechanism of the 1992 Roermond earthquake from surface-wave inversion of regional data, *116*, 663-672, 1994.
- Chevrot, S., et al, A preliminary catalog of moment tensors for the Pyrenees, *Tectonophysics*, *510*, 239-251, 2011.
- Ekstrom, G. et al., The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *200*, 1-9, 2013.
- Romanowicz, B. et al., monitoring of strain release in Central and Northern California using Broad-band data, *Geophysical Research Letters*, *20*, 1643-1646, 1993.