



Tests d'évaluation de la magnitude des séismes par analyse des ondes P : première étape dans l'étude de faisabilité technique d'un système d'alerte sismique précoce pyrénéen

Auteurs: Samuel AUCLAIR*, Anne LEMOINE*, Xavier GOULA, Julie BARON*, Teresa SUSAGNA****

* Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
3 avenue C. Guillemin, BP 36009, 45060 ORLEANS Cedex 2
s.auclair@brgm.fr, a.lemoine@brgm.fr

** Institut Geològic de Catalunya (IGC)
c. Balmes, 209-211, 08006 Barcelona – Espagne
xgoula@igc.cat, tsusagna@igc.cat

RÉSUMÉ. Dans le cadre d'un module du projet de recherche SISPy consacré, entre autre, à la faisabilité d'un système d'alerte sismique précoce (EEW – Earthquake Early Warning system) transfrontalier à l'échelle des Pyrénées, des travaux ont été entrepris afin d'évaluer la faisabilité technique d'un tel système. Dans un premier temps, l'enjeu a été de tester différentes méthodologies d'estimation rapide de la magnitude afin 1) de vérifier leur adaptabilité au contexte pyrénéen associé à une sismicité modérée, et 2) de tenter d'établir des relations empiriques de référence utilisables dans les Pyrénées. Pour ce faire, un catalogue de formes d'ondes de séismes pyrénéens a tout d'abord été élaboré, rassemblant plus de 4000 enregistrements issus de près de 200 événements sismiques. L'analyse de ces signaux a permis de mettre en évidence des corrélations entre la magnitude de référence des séismes et quatre indicateurs du mouvement sismique calculés à partir des premières secondes de l'onde P. Ces premiers résultats viennent conforter l'idée que le principe d'alerte sismique précoce est applicable aux Pyrénées.

ABSTRACT. In the frame of a work-package of the SISPy research project, dedicated to the feasibility of a Pyrenean cross-border Earthquake Early Warning system (EEW), a study has been performed in order to assess the technical feasibility of such a tool. In a first time, the main issue has been to test different real-time magnitude assessment methodologies in order 1) to check their adaptability to the Pyrenean context and its moderate seismicity, and 2) to try to establish reference empirical relations that could be used in Pyrenees. To that end, a waveform catalog had been first constituted, gathering more than 4.000 records from around 200 Pyrenean earthquakes. The analysis of these records has allowed us to highlight clear empirical correlations between reference magnitude of considered seismic events and four ground motion indicators calculated from first seconds of the P-wave. These first results reinforce that the principle of earthquake early warning is applicable to Pyrenees.

MOTS-CLÉS : alerte sismique précoce, Pyrénées, sismologie temps-réel, magnitude.

KEYWORDS: earthquake early warning, Pyrenees, real-time seismology, magnitude.

1. Introduction

Le massif des Pyrénées, qui résulte du mouvement compressif entre les plaques tectoniques Ibérique et Eurasienne et qui marque la frontière naturelle entre la France et l'Espagne, présente une sismicité qualifiée de modérée responsable de nombreux séismes destructeurs au cours de l'histoire, dont la magnitude maximale M_w peut vraisemblablement atteindre des valeurs de 6.0-6.5. De fait, les Pyrénées constituent l'une des régions de France métropolitaine et d'Espagne où l'aléa sismique est le plus important, ce qui a motivé le développement progressif de réseaux de surveillance sismologique du massif. Dans ce contexte, le projet Interreg SISPy (www.sispyr.eu) a pour principal objectif de permettre la mise en commun des données sismologiques au niveau des Pyrénées et d'améliorer la couverture du massif par les différents réseaux en favorisant un passage progressif des stations à une transmission en temps-réel. Afin de tirer profit au maximum des avantages offerts par la sismologie temps-réel, le projet SISPy vise également à évaluer la faisabilité d'un EEW pyrénéen.

Cette évaluation de faisabilité s'oriente selon deux grands axes relatifs à 1) la faisabilité technique d'un EEW pyrénéen, et 2) à l'opportunité de doter les Pyrénées d'un tel outil. Concernant l'étude de faisabilité technique, celle-ci repose en premier lieu sur la validation des méthodes empiriques sur lesquelles reposent les EEW, et qui consistent en une évaluation en temps quasi-réel de la magnitude à partir de l'analyse de quelques secondes seulement de l'onde P. L'objet des travaux présentés ici, lesquels sont encore en cours, est précisément de tester ces différentes méthodologies à partir de données sismiques exclusivement pyrénéennes.

2. Sismicité récente et historique des Pyrénées

Les Pyrénées représentent une zone montagneuse de 400 km de long marquant la frontière entre la France et l'Espagne. Avec plus de 400 séismes par an de magnitude supérieure à 2.0 - dont une dizaine peut être localement ressentie -, elles constituent l'une des régions métropolitaines françaises et espagnoles les plus sismiques.

En dépit de son activité sismique relativement modérée au regard d'autres pays européens tels que la Roumanie ou l'Italie, les Pyrénées ont enregistré par le passé de nombreux séismes destructeurs (Figure 1), parmi lesquels les événements de 1428, 1660, 1750 et 1967 qui ont atteint des intensités épicentrales supérieures ou égales à VIII (MSK). La partie Ouest du massif est caractérisée par une activité sismique plus marquée concentrée le long de la faille Nord-Pyrénéenne, alors que la partie Est présente une sismicité plus diffuse (Souriau et al., 2005). L'existence de nombreux séismes ayant causé des intensités supérieures à VII (MSK) souligne la nécessité de prêter une attention particulière à cette région en termes de risque sismique (Tableau 1).

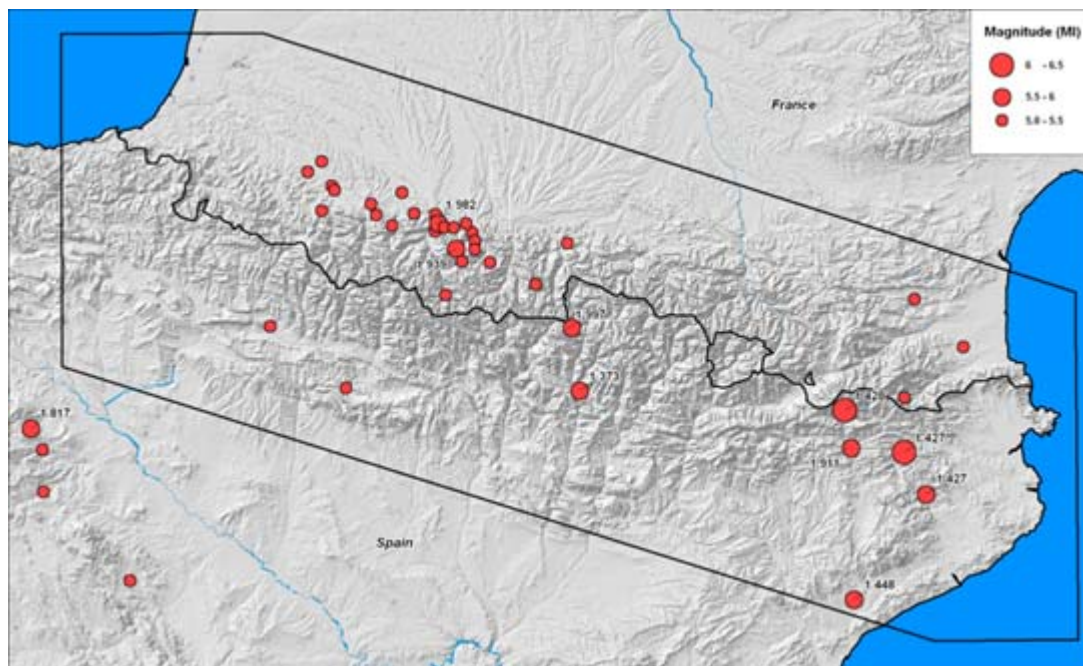


Figure 1 – Sismicité historique des Pyrénées. La zone du projet SISPy est indiquée en trait noir.

Localisation de l'épicentre	Date	Intensité épicentrale (MSK)
Pyrénées Orientales, Ripollès	02/02/1428	IX
Pyrénées centrales, Bigorre	21/06/1660	VIII-IX
Pyrénées centrales, Juncalas	24/05/1750	VIII
Pyrénées occidentales, vallée d'Ossau	22/05/1814	VII
Pyrénées centrales, Argelès-Gazost	20/07/1854	VII-VIII
Pyrénées occidentales, vallée d'Ossau	22/02/1924	VII
Pyrénées occidentales, Arette	13/08/1967	VIII
Pyrénées occidentales, Ossau-Arudy	29/02/1980	VII-VIII
Pyrénées occidentales, Pays Basque	06/01/1982	VI-VII
Pyrénées centrales, Bigorre	04/10/1999	VI
Pyrénées centrales, Bigorre	17/11/2006	VI

Tableau 1 – Principaux séismes historiques pyrénéens (source : base de données SisFrance – www.sisfrance.net : BRGM/EDF/IRSN 2009).

3. Test de méthodologies d'évaluation rapide de la magnitude des séismes

3.1 Méthodologies testées

Les méthodologies choisies pour être utilisées lors d'une phase de test sur les données pyrénéennes sont basées sur des corrélations empiriques entre les paramètres τ_c , τ_p^{max} , P_d et P_v calculés à partir des premières secondes de l'onde P sur la composante verticale du signal – cf. Tableau 2.

Notation	Description	Références principales
τ_c	Période dominante des premières secondes de l'onde P	Nakamura 1988 Allen et Kanamori 2003
τ_p^{\max}	Période effective (ou moyenne) des premières secondes de l'onde P	Kanamori 2005
P_d/P_v	Déplacement/vitesse maximal(e) des premières secondes de l'onde P	Wu et Kanamori 2005 Wu et Zhao 2006 Wurman et al. 2007 Zollo et al. 2006

Tableau 2 – Description synthétique des paramètres “proxy” utilisés pour la détermination de la magnitude en temps-réel.

3.2 Traitement et analyse des données

Catalogue de formes d'ondes

Afin d'être en mesure de tester les différentes méthodologies d'évaluation de la magnitude en temps-réel décrite précédemment dans le contexte pyrénéen, un catalogue de traces sismiques représentatif de la sismicité pyrénéenne a dans un premier temps été constitué. Ce travail a été réalisé avec la volonté non pas de construire un catalogue statistiquement représentatif de la sismicité le long de la chaîne des Pyrénées, mais contenant autant d'enregistrements que possible correspondant à l'ensemble des magnitudes attendues dans la région, et ce afin de contraindre au mieux notre analyse. Alors qu'une attention particulière doit être portée aux séismes de magnitudes les plus importantes susceptibles de produire des dommages (la valeur probable la plus importante étant de l'ordre de 6.5), les enregistrements de séismes plus modestes ont également été considérés afin de s'assurer de pouvoir être en mesure de les distinguer dans le cadre d'une analyse en temps-réel.

Du fait de l'installation progressive des instruments de surveillance sismique à travers les Pyrénées, la constitution du catalogue a été réalisée en intégrant toutes les données disponibles, dans un premier temps sans aucune restriction concernant le type d'instrument ou le mode de communication. Par ailleurs, les différents proxys de magnitude retenus étant calculés sur la seule composante verticale, les traces horizontales n'ont pas été intégrées au catalogue. En pratique, le catalogue est composé d'enregistrements accélérométriques et vélocimétriques (« courtes-périodes » et « larges-bandes ») fournies par les différents organismes en charge de stations dans la région (IGC, IGN, OMP et BRGM).

Au final, le catalogue de formes d'ondes utilisé dans le cadre de cette étude est constitué de près de 4000 enregistrements issus de 189 séismes de magnitude locale LDG comprise entre 2.5 et 5.6.

Traitement des données

Les données présentes dans le catalogue ont tout d'abord été corrigées de la réponse instrumentale puis l'onde P a été pointée manuellement sur les traces verticales non-filtrées.

Après une procédure d'intégration simple ou double puis l'application d'un filtre passe bande Butterworth entre 1 et 10 Hz, le pic de déplacement P_d et de vitesse P_v , ainsi que les paramètres de période τ_c et τ_p^{\max} ont été calculés à partir des signaux en déplacement et/ou en vitesse sur la base d'une fenêtre d'analyse variant entre 1 et 4 secondes après l'arrivée de l'onde P. Pour éviter la « contamination » de la fenêtre analysée avec l'arrivée de l'onde S, nous avons rejeté tous les enregistrements présentant un écart de temps entre l'arrivée des ondes P et S insuffisant (i.e. inférieure à la durée retenue pour le calcul des proxys). Plutôt que de pointer systématiquement l'onde S, nous avons considéré la procédure proposée par Wurman et al. (2007), laquelle est basée sur le calcul de manière simplifiée de l'arrivée théorique des ondes S.

Afin de garantir la qualité de notre analyse, nous avons également écarté toutes les traces jugées trop bruitées sur la base d'un rapport signal sur bruit au moins égal à 30 pour les paramètres de pic que sont P_d et P_v , et à 100 pour les paramètres de période τ_c et τ_p^{max} .

Enfin, pour des raisons d'homogénéité, nous avons focalisé notre analyse sur les mesures enregistrées à une distance épacentrale inférieure ou égale à 60 km, les stations étant situées à plus grandes distances ne jouant en pratique aucun rôle dans les procédures d'émission d'alertes sismiques précoces.

4. Résultats

Une fois les « proxys » de magnitude calculés pour l'ensemble des données pyrénéennes retenues, il est possible de comparer ces paramètres aux magnitudes de référence de chaque séisme dans le but d'établir dans quelle mesure ces paramètres calculables en temps-réel sont corrélés à la magnitude finale des séismes. Les paramètres de pic que sont P_d et P_v , étant fonction non seulement de la magnitude mais également de la distance à la source, nous les avons normalisés à une distance hypocentrale de référence (fixée à 10 km) comme suggéré par Zollo et al. (2006), ce qui permet de s'affranchir de l'atténuation de l'amplitude du signal due à la distance. Ainsi, nous évaluons directement des corrélations empiriques reliant la magnitude aux valeurs normalisées P_d^{10} et P_v^{10} .

Pour réduire autant que possible la dispersion, il est préférable de considérer les valeurs de proxy moyennées par événement plutôt que les valeurs ponctuelles obtenues au niveau de chaque station (Wu et Kanamori, 2005). A cette fin, nous considérons non pas une moyenne des paramètres τ_c , τ_p^{max} , P_d^{10} et P_v^{10} , mais plutôt la moyenne de leurs logarithmes décimaux, lesquels sont supposés être linéairement corrélés à la magnitude. En outre, et dans le but d'éviter de donner trop de poids à certains enregistrements, seuls les séismes pour lesquels nous disposons d'au moins trois traces satisfaisant à nos critères de sélection sont retenus pour la régression.

Un exemple de résultats préliminaires obtenus à partir d'une analyse de l'onde P de 3 secondes est présenté sur la Figure 2. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 2, une nette corrélation apparaît entre les proxys testés et la magnitude des séismes pyrénéens. Cependant, il est important de remarquer que pour ce qui est du paramètre τ_c , et lorsque l'on considère des magnitudes inférieures à $4.0M_{IGN}$, la dispersion augmente au point que l'hypothèse de dépendance log-linéaire avec la magnitude ne semble plus valable. Il n'est cependant pas surprenant de n'observer pour cet indicateur une corrélation qu'à partir d'une certaine magnitude. En effet, il est fort probable que le filtre passe-bande utilisé (entre 1 et 10 Hz) ne permette pas une caractérisation précise de la fréquence moyenne du signal pour les petits séismes, dans la mesure où celle-ci est généralement assez élevée.

Par ailleurs, compte-tenu de la gamme de magnitude des séismes considérés, nous observons également de bonnes corrélations pour une durée d'analyse très faible (1 s), ces séismes étant associés à des ruptures relativement peu étendues et par conséquent rapides. En d'autres mots, la portion du signal analysée, bien que très petite, contient la signature d'une grande partie de la rupture – si ce n'est de toute –, et par voie de conséquence nous renseigne directement sur la magnitude. Une étude de Murphy et Nielsen (2009) a ainsi montré qu'une analyse d'une seconde de l'onde P est assez longue pour évaluer les magnitudes de moment inférieures à 6.0 ($2s \rightarrow M_w < 6.5$; $3s \rightarrow M_w < 7.0$). Ainsi, en considérant une magnitude maximale probable de 6.5 pour les séismes pyrénéens, une analyse de 2 s de l'onde P apparaît suffisante pour estimer la magnitude en temps quasi réel.

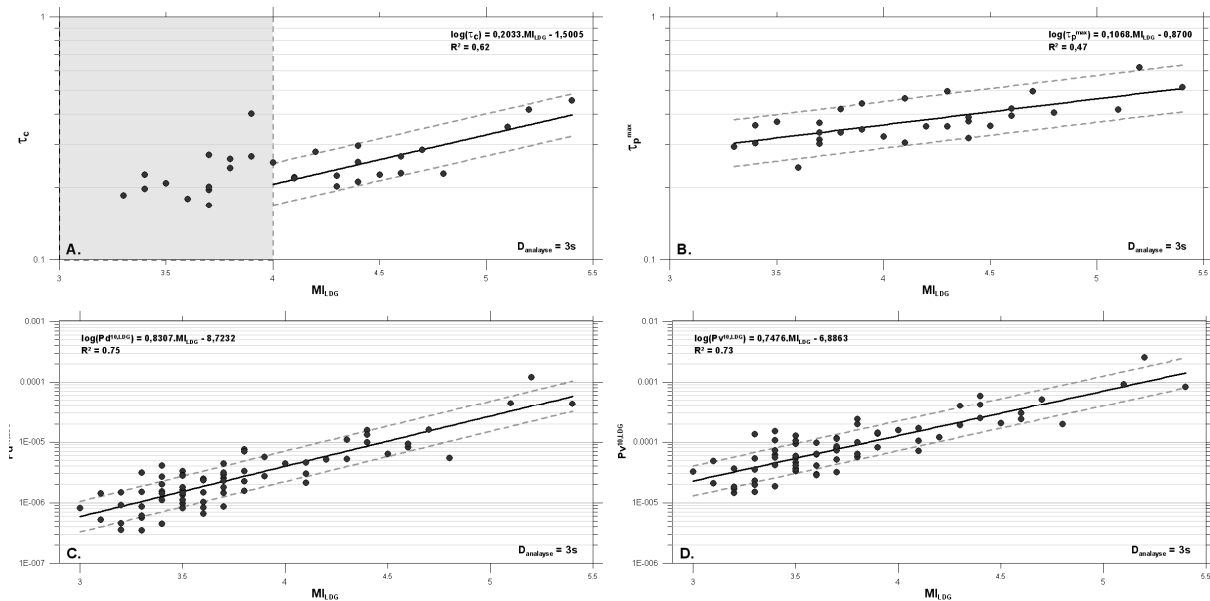


Figure 2 – Corrélations empiriques liant les paramètres proxy τ_c , τ_p^{max} , P_d et P_v (moyenne par séisme) avec la magnitude locale du LDG pour les séismes pyrénéens. Calculs réalisés sur les traces du catalogue satisfaisant aux critères de sélection (durée d'analyse fixée à 3 s). La droite obtenue par régression linéaire est indiquée en noire, alors que les droites en tirets grisés représentent l'intervalle de confiance à 95% pour une nouvelle observation. *Résultats préliminaires.*

5. Conclusions et perspectives

Grâce aux avancées réalisées dans le cadre du projet *SISPy* dans la surveillance sismique à l'échelle des Pyrénées et notamment au partage en temps-réel de données, il est désormais possible de tester la faisabilité technique d'un EEW couvrant l'ensemble du massif pyrénéen. Un tel système viserait à émettre des alertes précoces de quelques secondes avant l'arrivée des ondes sismiques destructrices dans le cas de forts séismes, à l'image du séisme d'Arette de 1967.

L'exploration d'un important set d'enregistrements sismiques pyrénéens rassemblés pour les besoins du projet *SISPy* a permis de mettre en évidence que les principales méthodologies d'évaluation de la magnitude en temps-réel mises au point pour l'alerte sismique précoce sont tout à fait adaptées au contexte pyrénéen. Par ailleurs, et compte-tenu des magnitudes attendues au niveau des Pyrénées, une fenêtre d'analyse de l'onde P extrêmement courte semble suffisante pour une évaluation préliminaire de la magnitude. Cependant, il apparaît que les données disponibles ne permettent pas de définir des relations empiriques de référence utilisables à des visées d'alerte au niveau pyrénéen, notamment du fait de l'absence de données relatives à des séismes de fortes magnitudes. Par conséquent, si les corrélations établies permettent de valider le concept d'EEW au niveau pyrénéen, elles ne peuvent en revanche pas être utilisées en cas de forts séismes, lesquels sont précisément l'objet des EEW.

Le contexte sismotectonique en présence dans les Pyrénées suggérant des magnitudes pouvant atteindre des valeurs proches de 6.5, il convient d'explorer des manières d'étendre les relations établies à une gamme plus étendue de magnitudes. Pour ce faire, l'une des possibilités serait de pouvoir utiliser des relations internationales après s'être assuré de leur accord avec les données collectées dans le cadre de la présente étude. Afin de procéder à cette confrontation des données pyrénéennes aux relations empiriques élaborées dans divers pays, des tests sont

actuellement en cours. Ceux-ci se basent notamment sur une exclusion des signaux « courtes-périodes » permettant de travailler une gamme de fréquences élargie.

6. Remerciements

Ce travail a été en grande partie financé par le programme POCTEFA, projet EFA73/08-SISPYR 2009-2011. Les auteurs tiennent par ailleurs à remercier chaleureusement M. Lancieri pour les discussions menées ensemble ainsi que pour ses commentaires avisés. Merci également à R. Allen pour les éclaircissements apportés concernant le paramètre τ_p^{\max} .

7. Bibliographie

- Allen R.M., H. Kanamori (2003). "The potential for earthquake early warning in southern California." *Science* 300, 786–789.
- Kanamori H. (2005). "Real-time seismology and earthquake damage mitigation." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 195–214.
- Murphy, S., and S. Nielsen (2009). "Estimating earthquake magnitude with early arrivals: A test using dynamic and kinematic models." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 1–23.
- Nakamura Y. (1988). "On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS)." Presented at Ninth World Conf. Earthq. Eng., Tokyo.
- Souriau A., A. Rigo, N. Dubos, M. Sylvander C. Ponsolles (2005). "Analysis of the seismicity in the central part of the Pyrenees (France) and tectonic implications." *Journal of Seismology*, 9, 211-222.
- Wu Y.-M., H. Kanamori (2005). "Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves." *Bulletin of the Seismological Society of America* 95, 1,181–1,185.
- Wu Y.-M., L. Zhao (2006). "Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning", *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16312.
- Wurman G., R. M. Allen, P. Lombard (2007). "Toward earthquake early warning in northern California." *Journal of Geophysical Research* 112.
- Zollo A., M. Lancieri, S. Nielsen (2006). "Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records." *Geophysical Research Letters* 33, L23312.
- Zollo A., O. Amoroso, M. Lancieri, Y.-M. Wu, H. Kanamori (2010). "A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks." *Geophys. J. Int.*, 183, 963–974.