

RAPPORTS DE PRÉ-SOUTENANCE

M. Michel CAMPILLO - Université Joseph Fourier - *Rapporteur externe*

M. Pascal BERNARD - Inst. de Phys. du Globe de Paris - *Rapporteur externe*

M. Jean-Jacques LÉVÊQUE - Université de Strasbourg - *Rapporteur interne*

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

RAPPORT de PRESENTATION de la THÈSE

FORMULAIRE A RENVOYER OBLIGATOIREMENT AVEC LE RAPPORT

15 jours avant la soutenance sous peine de report de celle-ci

Nom du candidat : **M. Zacharie DUPUTEL**

Titre de la thèse : Détermination rapide des paramètres physiques de la source des grands séismes à l'aide de la Phase W.

Composition du jury de soutenance :

Directeur(s) de thèse :
M. L. RIVERA

Rapporteurs :
M. J-J. LEVEQUE
M. P. BERNARD
M. M. CAMPILLO

Autre(s) membres du jury :
Mme H. HEBERT
M. M. SIMONS

Rapport de **M. M. CAMPILLO**

1° ÉVALUATION GÉNÉRALE

Par comparaison avec des thèses de Doctorat récentes soutenues dans votre Université, ou dont vous avez eu connaissance personnellement, cette thèse est-elle à votre avis digne d'être soutenue en vue du Doctorat ?

OUI ☒

NON [] (*)

(*)Le refus d'attribution du grade de docteur devra toujours faire l'objet d'un rapport circonstancié.

Dans l'affirmative et avant soutenance, cette thèse est-elle d'un niveau scientifique :

SATISFAISANT []

BON []

TRÈS BON []

EXCEPTIONNEL ☒

Vu et autorisation de soutenance
Le Président de l'Université

Date : 24/10/2011
Signature du Rapporteur :





Michel Campillo

Téléphone: 33(0) 4 76 63 52 60
Télécopie: 33(0) 4 76 63 52 52

Michel.Campillo@ujf-grenoble.fr

Web: www.isterre.fr

Maison des Géosciences
BP 53
38041 Grenoble cedex 9
France

Unité Mixte de Recherche
CNRS 5275
IRD 219
UJF/CNRS/UdS/IRD/IFSTTAR



Rapport sur le mémoire présenté par Zacharie DUPUTEL

Ce travail est centré sur la question de l'évaluation quantitative des paramètres décrivant la source des grands séismes. Il présente l'implémentation d'une nouvelle méthode qui permet de réaliser cette évaluation plus rapidement que les méthodes traditionnelles en utilisant la phase longue période W. Ceci correspond à un progrès notable pour l'alerte en temps réel, tout particulièrement en ce qui concerne les tsunamis. En effet le temps gagné pour obtenir une évaluation fiable des paramètres à la sources (magnitude de moment, mécanisme, centroïde) dans les minutes qui suivent le séisme se traduit par une efficacité accrue des alertes qui peuvent être fournies aux populations. Ce travail est en grande partie très fondamental mais il rejoint des applications très pratiques et très importantes dans la perspective de la mitigation des risques naturels.

Le mémoire commence par une présentation très synthétique du problème abordé et de la phase W. L'intérêt d'une phase rapide et longue période est bien présenté dans le contexte de la saturation de la magnitude à moyenne période pour les très grands événements, ou les événements à tsunamis. Les aspects théoriques de l'excitation et de la propagation de la phase W sont clairement présentés et une analyse de sensibilité détaillée montre bien l'avantage de l'utilisation de la phase W considérant l'hétérogénéité des couches de surface. Le chapitre 2 donne la description de la chaîne d'analyse et de son implantation. Les choix sont liés à l'application temps réel qui est visée. Je ne décris pas ici l'ensemble du travail mais il faut noter le soin rigoureux apporté au traitement des données (analyse du bruit, déconvolution,...), à l'inversion des différents paramètres et à la recherche d'efficacité numérique dans l'implémentation des codes. Une première application de la méthode montre que la durée de source déduite de l'algorithme, comparée avec celle attendue d'après les lois d'échelle, pourrait être un bon indicateur des séismes à tsunamis.

Dans le chapitre 3, un article présente une analyse systématique de 2541 séismes de magnitude supérieure à 6.5 qui se sont produits depuis 1990. Il faut d'abord noter l'agrément avec les résultats des méthodes classiques, alors que le W-CMT se base sur des temps d'enregistrements nettement plus petits. Le tri des données est sévère et l'ensemble de la procédure est automatisé. Seulement quelques séismes ne sont pas correctement évalués automatiquement avec la phase W. Ils correspondent essentiellement à des groupes d'événements qui se produisent dans des temps très courts. Une stratégie spécifique pour ces cas est présentée et validée. La chaîne d'analyse a été installée pour le temps réel à l'observatoire de Strasbourg, à l'US Geological Survey et au Pacific Tsunami Warning Center. Les performances sont discutées pour Strasbourg et le PTWC. Les cas de grands séismes sont discutés, et en détail celui du séisme de Tohoku avec une spectaculaire directivité de la phase W. La méthode est maintenant clairement validée et opérationnelle à l'échelle globale pour les grands séismes. Les temps de traitement sont très réduits grâce à l'optimisation réalisée par Zacharie Duputel.



Dans le chapitre 4, c'est une application à l'échelle régionale, et pour des séismes plus petits qui est présentée pour le Japon et le Mexique. Dans le cas du Japon il s'agit d'une étude a posteriori qui démontre la faisabilité de la méthode WCMT avec les données du réseau large-bande F-NET pour des distances épicentrales entre 5 et 12° ou entre 5 et 25°. Outre la confirmation de la validité de l'approche pour des séismes de magnitude aussi petite que 6 qui se situent dans le réseau ou dans son voisinage immédiat, un résultat frappant est l'application au séisme de Tohoku. Il est montré qu'en utilisant F-NET il était possible de donner des caractéristiques de la source réalistes avec seulement 6 mn d'enregistrement, c'est à dire avant l'arrivée du tsunami sur les cotes de Tohoku, c'est à dire 15 mn après le séisme. C'est un résultat très encourageant. Une application régionale a été réalisée avec l'installation du traitement temps-réel au Service sismologique national du Mexique (SSN). De très bons résultats ont été obtenus, confirmés par les CMT calculés avec le réseau global et la méthode conventionnelle a posteriori. Notons que les GPS haute fréquence offrent une opportunité de dépasser la limitation associée à la saturation des enregistrements à échelle régionale pour les grands séismes.

Le dernier chapitre traite du problème crucial de l'évaluation des erreurs dans les inversions de CMT. C'est un problème qui se pose plus généralement dans les inversions cinématiques du glissement. L'approche est basée sur la construction de matrices de covariance réalistes, c'est à dire incluant des termes non diagonaux qui expriment la non indépendance des erreurs sur les données temporelles et des paramètres de la théorie incomplète qui est utilisée. Il est montré qu'au delà de l'information objective sur les incertitudes des évaluations, une prise en compte plus précise des erreurs conduit à de meilleurs modèles.

Le travail présenté ici est très achevé puisqu'il inclut des développements méthodologiques importants comme le dernier chapitre mais aussi des applications opérationnelles. L'outil développé permet de mettre à disposition de la communauté sismologique des informations très importantes pour la compréhension de la physique des séismes, en particulier des lois d'échelles. Par ailleurs, il est appelé à devenir un élément très important pour la sismologie en temps réel et l'alerte en cas de grands séismes et de possibles tsunamis. Zacharie Duputel a fait un excellent travail, impressionnant par son volume et son aboutissement. Il montre là de grandes compétences sur différents aspects des sujets les plus avancés de la sismologie moderne. Je donne donc un avis très favorable à la présentation de ce mémoire pour l'obtention du titre de docteur.

Fait à Grenoble le 21 octobre 2011.



*Michel Campillo
Professeur
Université Joseph Fourier et
Institut Universitaire de France*

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

RAPPORT de PRESENTATION de la THÈSE

FORMULAIRE A RENVoyer OBLIGATOIREMENT AVEC LE RAPPORT
15 jours avant la soutenance sous peine de report de celle-ci

Nom du candidat : **M. Zacharie DUPUTEL**

Titre de la thèse : Détermination rapide des paramètres de la source des grands séismes à partir de la Phase W.

Composition du jury de soutenance :

Directeur(s) de thèse :
M. L. RIVERA

Rapporteur(s) :
M. J-J. LEVEQUE
M. P. BERNARD
M. M. CAMPILLO

Autre(s) membre(s) du jury :
Mme H. HEBERT
M. M. SIMONS

Rapport de **M. P. BERNARD**

1° ÉVALUATION GÉNÉRALE

Par comparaison avec des thèses de Doctorat récentes soutenues dans votre Université, ou dont vous avez eu connaissance personnellement, cette thèse est-elle à votre avis digne d'être soutenue en vue du Doctorat ?

OUI



NON []

(*)

(*) le refus d'attribution du grade de docteur devra toujours faire l'objet d'un rapport circonstancié.

Dans l'affirmative et avant soutenance, cette thèse est-elle d'un niveau scientifique :

SATISFAISANT []

BON []

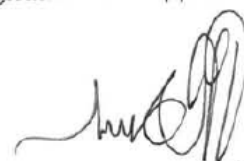
TRÈS BON [X]

EXCEPTIONNEL [X]

Date : 10.11.2011

Signature du Rapporteur :

Vu et autorisation de soutenance.
Le Président de l'Université



Rapport sur la Thèse de Zacharie Duputel

Détermination rapide des paramètres de la source des grands séismes à partir de la phase W

par Pascal Bernard

Le mémoire de Thèse de Zacharie Duputel présente les développements et les applications de l'analyse de la phase W des grands séismes (Kanamori, 1993), à des fins de détermination rapide et fiable des paramètres principaux des sources, en particulier magnitude et mécanisme – paramètres essentiels à une bonne gestion de la crise, en particulier pour les alertes tsunامي. Cette phase W, détectable sur les sismomètres large bande, et correspondant à des superposition de modes propres de longue période entre 200s et 1000s arrivant avant les ondes de surface, apportent des informations robustes sur la source en raison de leur faible sensibilité aux hétérogénéités latérales du globe.

Dans le chapitre 1: **Nature de la phase W**, l'auteur introduit la représentation classique des sources sismiques et de leur rayonnement par le terme de "stress glut" et les équations de base de l'élasto-dynamique pour une terre sphérique autogravitante. Il montre l'allure de la phase W sur plusieurs enregistrements filtrés dans la bande 1-5 mHz. L'analyse de la vitesse de groupe des modes sphéroïdaux et toroïdaux dans le domaine 4.5-9 km/s permet de montrer l'influence dominante des modes graves ($n=1, 2$ et 3) dans cette phase. Les simulations en champ complet montrent très bien l'excellente qualité de la modélisation de cette phase, même avec le modèle simpliste de point source pour des magnitudes élevées.

L'effet de la structure du globe sur l'amplitude de la phase W, en 1D et en 3D, est étudiée via des noyaux de sensibilité adaptés, montrant une sensibilité plus marquée à la vitesse des ondes S. L'analyse 3D permet de localiser les zones d'influence majeurs au niveau de la source et de la station, mais aussi à grande profondeur dans le manteau.

Ce chapitre introductif est très éclairant. Il pourrait cependant apporter quelques précisions supplémentaires.

- Dans un but didactique, comment est définie et calculée pratiquement la vitesse de groupe des modes à $n=\text{constante}$? Il serait intéressant de montrer le noyau de sensibilité en profondeur de ces modes, et de préciser les différences avec la superposition des modes aboutissant aux ondes de surface.
- quelles sont les erreurs quantitatives attendues pour les approximations de terre sphérique (ellipticité, rotation, hétérogénéité grande longueur d'onde) et de précontrainte?
- comment peut être traité le problème de rupture de surface? Y-a-t-il des difficultés particulières?
- le concept de "stress glut" devrait être mieux explicité: le schéma de la fig 1.1 n'est pas clair, il faudrait montrer les fonctions sur des distances plus grandes, incluant la partie élastique.
- Il faudrait expliquer ce que représente le "stress glut" par rapport à la chute de contrainte classique des sismologues en cas de double-couple.
- Le schéma des oscillations libres (fig 1.2) devraient représenter les modes dominants de la phase W: donc aussi $n=1$ et $n=2$.
- il faudrait une figure avec le modèle PREM, pour référence.
- Il faudrait montrer un exemple de phase W pour un séisme modéré (car il est mentionné en conclusion)
- le choix des amplitudes relatives de perturbations de vitesse P, S, et de densité, devrait être justifié.
- Sur l'interprétation de la phase W, il est rappelé l'effet de la surface libre (multiples PP, PS, ...), mais il n'est pas mentionné l'effet possible de l'interface noyau-manteau : forte réflexions P et surtout S (PcP, PcS, ScS, ..., qui arrivent dans la phase W pour des distances

suffisantes), et agit comme une surface libre pour les modes toroïdaux. Cela mérite discussion, voire calculs et illustrations.

Dans le chapitre 2, **algorithme d'inversion WCMT**, l'auteur décrit la méthode d'extraction de la phase W par déconvolution dans le domaine temporel, et analyse la limitation liée au bruit de fond sismique sur la résolution pour les plus faibles magnitudes. Il pose en détail le problème inverse de détermination du tenseur de moment sismique, en particulier pour l'inversion double-couple. La fonction source (fonction triangle à 2 paramètres) est résolue par recherche sur une grille, tout comme la position du centroïde spatial. L'efficacité de l'algorithme provient de l'usage d'une base de fonction de Green précalculées. L'auteur montre les différentes étapes de l'algorithme, et en évalue les performances de calcul. Il termine par un exemple d'application sur les séismes "tsunamis", et introduit une caractérisation simple du délai de source mettant en évidence leur délai anormal. Ce chapitre est clairement rédigé et illustré, démontrant l'efficacité remarquable de cet algorithme pour une inversion en typiquement moins d'une minute.

- fig 2.3: sur la station TATO, la saturation a lieu vers $t=1400s$, mais la déconvolution diverge bien avant, pour les ondes de Rayleigh (après la phase W). Est-ce un problème instrumental, ou de modélisation?
- Pour l'application "séismes tsunami", il est mentionné une vitesse de rupture anormalement lente. Peut-elle être distinguée d'un modèle alternatif avec glissement anormalement long ?

Dans le chapitre 3, **Application à l'échelle globale**, l'auteur caractérise les paramètres à la source de 2542 séismes de magnitude > 6 entre 1990 et 2010. Trois étapes opérationnelles sont définies: OL1, la magnitude est estimée grossièrement par l'amplitude de la composante verticale de la phase W, réduite à la distance de 40° et ajustée à un mécanisme dip-slip; OL2, le tenseur des moments est inversé ainsi que la fonction source, avec les paramètres de position préliminaire du PDE; OL3, la position centroidale est raffinée par une recherche sur grille. Les magnitudes trouvées sont à 0.1 point d'écart rms des résultats de Harvard et du Global CMT (GCMT), les écarts angulaires des mécanismes de moins de 20° , et la première évaluation se fait avec un délai de 22 minutes, ce qui est un résultat remarquable, et très important pour l'alerte. Un effort particulier a dû être mené pour inverser des séismes perturbés par les précédents, par ajustement des sources et corrections successives. Une étude détaillée de plusieurs séismes (2 séismes tsunamis, Sumatra 2004, Haiti 2010, Maule 2010, Tohoku 2011) illustre très bien la grande qualité des résultats. La méthode (WCMT) a été implémentée avec succès au Pacific Tsunami Warning Center, à l'USGS, et à l'IPGS. Ce chapitre, très bien construit et illustré, a fait l'objet d'un article en révision à GJI sur la méthode globale, et un article publié à EPS sur le séisme de Tohoku 2011.

Dans le chapitre 4, **Application à l'échelle régionale**, l'auteur s'attache à l'inversion WCMT pour les séismes du Japon de magnitude > 6 entre 2003 et 2010, avec des solutions obtenues 6 minutes et 12 minutes après le temps origine. Pour ce faire, la fenêtre de temps est augmentée à 180 s après le passage de la P. La caractérisation finale est robuste et fiable. Une étude similaire au Mexique, avec implémentation en temps réel, montre la faisabilité de la méthode pour les magnitudes plus faibles (entre 5 et 6). Ce chapitre, lui aussi bien construit et illustré, montre l'efficacité de cette approche même pour des séismes modérés, ce qui en accroît d'autant la portée.

J'ai cependant quelques remarques et questions:

- le prolongement de la fenêtre d'étude (t_p+180s) peut faire rentrer les ondes de surface dans l'analyse. Il faudrait dessiner les phases pour Love et Rayleigh dans figure 4.2. Quelle est l'influence de ces ondes de surface "ordinaires" dans l'inversion?
- Une Figure plus détaillée des sismogrammes pour le séisme de Ryukyu 2010 permettrait de mieux voir les formes d'onde, et de pointer les ondes de surface éventuelles.
- Une figure avec un zoom sur la phase W, coupant avant les ondes de surface, pourrait-elle montrer une phase plus simple, interprétable plus facilement en terme de champ proche?
- Il y a une coquille p135: $\delta=11^\circ$

Dans le chapitre 5, **Analyse d'erreur dans les inversions de la source sismique**, l'auteur s'attache à trois applications particulière d'inversion liées à la phase W: la prise en compte du bruit de fond, l'interdépendance entre les échantillons, et l'incertitude de modélisation. Pour le bruit de fond, des inversions avec des signaux synthétiques bruités donnent parfois des résultats très erronés, et démontre la sous-estimation de l'erreur vraie par l'erreur a posteriori calculée sans prendre en compte ce bruit de fond. Sa prise en compte dans l'analyse d'erreur permet de retrouver des solutions convenables. De même, la prise en compte de la corrélation des mesures permet de mieux estimer le modèle vrai.

Le choix pour illustrer l'effet de l'incertitude sur les modèles porte sur la localisation du centroïde. L'auteur montre qu'une bonne estimation de cette incertitude permet de retrouver correctement les mécanismes. Après des tests très démonstratifs, sont présentées diverses applications (Pérou 2001, Kokoxilli 2001). Une approche similaire d'analyse d'erreur est aussi appliquée avec succès à la séquences de séismes du Vanuatu, le résidu de modélisation de chaque événement étant réinjecté comme niveau d'incertitude pour le suivant, et pour déterminer le pendage du séisme de Tohoku 2011. Cette partie fait l'objet d'un article soumis au GJI.

Dans la dernière partie de ce chapitre, l'auteur aborde l'incertitude sur le moment scalaire, la profondeur, et le pendage, paramètres très importants pour l'évaluation du risque tsunami. La dépendance entre le pendage et le moment est bien introduite et illustrée, et la capacité de la phase W à résoudre ces deux paramètres est bien démontrée, capacité résultant d'une variation azimutale de l'amplitude qui dépend du pendage pour les composantes horizontales (mais pas pour les verticales), ce qui est un autre résultat important de ce travail. Une étude de la profondeur du centroïde tente de prendre en compte la variabilité de la fonction qui minimise l'écart aux données. Pour finir, une inversion WCMT est menée pour le séisme de Tohoku 2011, la position centroïde étant contrainte par la géométrie a priori de la subduction.

Une remarque:

- L'évolution du RMS avec le paramètre profondeur montre une faible réduction (typiquement moins de 10% de variation entre 0 et 30 km). Le minimum est-il significatif? Il ne me semble pas que l'analyse de la variabilité du RMS réponde à cette question. Peut-on évaluer le domaine acceptable de profondeurs - en terme de probabilités prenant en compte cette faible diminution de variance?

Conclusion du rapport:

Ce mémoire de thèse de Zacharie Duputel présente des résultats nouveaux et remarquables sur la phase W des séismes, déterminant de manière fiable et très rapide les principaux paramètres de la source des grands séismes grâce à des algorithmes de traitement, de simulation et d'inversion très performants. Ce travail a déjà des applications opérationnelles dans les principaux centres d'alerte sismique et tsunamique mondiaux. A la lecture de cet excellent mémoire, rédigé de manière claire, didactique, et bien illustrée, et qui a fait déjà l'objet de 3 publications soumises, dont une en révision, Zacharie Duputel paraît tout à fait à même de défendre son travail pour l'obtention d'un Doctorat en Géophysique Interne.

A Paris, le 1er Novembre 2011

Pascal Bernard

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

RAPPORT de PRESENTATION de la THÈSE

FORMULAIRE A RENVoyer OBLIGATOIREMENT AVEC LE RAPPORT

15 jours avant la soutenance sous peine de report de celle-ci

Nom du candidat : **M. Zacharie DUPUTEL****Titre de la thèse** : Détermination rapide des paramètres physiques de la source des grands séismes à l'aide de la Phase W.

Composition du jury de soutenance :

Directeur(s) de thèse :
M. L. RIVERARapporteurs :
M. J-J. LEVEQUE
M. P. BERNARD
M. M. CAMPILLOAutre(s) membre(s) du jury :
Mme H. HEBERT
M. M. SIMONSRapport de **M. J-J. LEVEQUE**

1° ÉVALUATION GÉNÉRALE

Par comparaison avec des thèses de Doctorat récentes soutenues dans votre Université, ou dont vous avez eu connaissance personnellement, cette thèse est-elle à votre avis digne d'être soutenue en vue du Doctorat ?

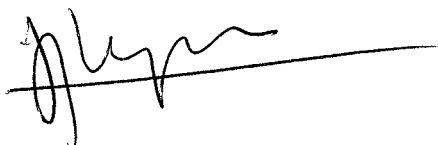
OUI ☒ NON ☐ (*)

(*) le refus d'attribution du grade de docteur devra toujours faire l'objet d'un rapport circonstancié.

Dans l'affirmative et avant soutenance, cette thèse est-elle d'un niveau scientifique :

SATISFAISANT ☐ BON ☐ TRÈS BON ☐ EXCEPTIONNEL ☒

Vu et autorisation de soutenance.

Date : 29 octobre 2011

*Rapport sur le mémoire de thèse présenté par **Zacharie Duputel**
en vue de l'obtention du titre de
Docteur de l'Université de Strasbourg
spécialité: Géophysique Interne*

Ce travail de thèse, intitulé « *Détermination rapide des paramètres à la source des grands séismes à partir de la phase W* », est consacré au développement d'une méthode permettant de retrouver la magnitude et le tenseur des moments sismiques en exploitant une onde sismique « exotique » dénommée phase W. Les bases de la méthode ayant été établies peu avant son début (Kanamori et Rivera, 2008), l'objet de la thèse consiste à explorer toutes les facettes et possibilités de cette méthode en vue d'obtenir un résultat fiable très rapidement après le déclenchement du séisme, afin de permettre en particulier son utilisation dans les centres d'alertes aux séismes et aux tsunamis.

Le mémoire est organisé en 5 parties: une présentation de la nature de la phase W, une présentation de l'algorithme d'inversion pour les paramètres à la source, un gros chapitre consacré à son application à l'échelle globale, suivi d'un autre, plus petit, pour des applications à l'échelle régionale, et pour finir, une analyse très intéressante et fructueuse des incertitudes aux différentes étapes du processus.

La première partie a pour objet de familiariser le lecteur avec la phase W en montrant quelques exemples, en analysant sa composition en termes de modes propres, et en expliquant pour quelles raisons cette phase est d'un grand intérêt pour la production rapide des paramètres à la source. Ce travail pédagogique est bien mené et permet effectivement de connaître les caractéristiques de ce signal, les conditions dans lesquelles on peut l'observer et sa sensibilité à la structure de la Terre. Certaines hypothèses simplificatrices et les choix utilisés dans la suite du travail sont clairement justifiés à cette occasion.

La seconde partie traite de l'algorithme d'inversion permettant de passer des observations de la phase W à différentes stations aux paramètres caractérisant la source sismique. La méthodologie était déjà définie antérieurement à la thèse (K&R 2008) et avait été appliquée à quelques grands séismes en utilisant uniquement la composante verticale du mouvement du sol. La méthode est reprise et exposée ici en détail, avec les informations et commentaires utiles sur la façon dont la déconvolution de la réponse instrumentale est réalisée, sur le choix de la bande de fréquence modélisée, sur les critères d'acceptation des sismogrammes, entre autres. L'extension au traitement des trois composantes apparaît naturellement dans ce chapitre, ainsi que les différentes options possibles pour inverser ou fixer la valeur des paramètres de la source selon le but recherché. L'implémentation et l'optimisation du code correspondant à l'algorithme, et ses performances, sont également discutées. Une application à 7 séismes tsunamigéniques donne une première illustration des bons résultats obtenus grâce à cet outil.

Le troisième partie, la plus volumineuse, est dédiée à l'application systématique de la méthode à l'échelle globale, c'est-à-dire en utilisant les stations du réseau global pour traiter le cas des très grands séismes enregistrés à des distances téléseismiques. Cette partie contient deux articles. Le premier (en révision) est consacré à une étude systématique de tous les séismes de $M_w > 6.5$ s'étant produit entre 1990 et 2010. Il démontre qu'en utilisant les 3 composantes de la phase W et en raffinant la méthode, on peut obtenir pour ces séismes, 35 minutes après leur déclenchement, les caractéristiques de la source avec une grande fiabilité et une grande précision, les valeurs trouvées étant très proches des paramètres GCMT obtenu par la méthode classique avec un délai plus important. Ce résultat confirme le potentiel de

l'approche proposée en termes de rapidité et de qualité, ce qui valide l'intérêt de l'utiliser en temps réel dans les centres d'alerte, et l'étend également à des séismes beaucoup plus petits que ceux ciblés au départ. Le second article (publié) étudie spécifiquement le cas du séisme du Japon du 11 mars 2011, Mw=9, tel qu'il a été traité en temps réel dans les 2 centres d'alerte où l'algorithme avait été implanté (USGS et PTWC), avec une analyse critique des points ayant posé problème et des remèdes possibles.

La quatrième partie est similaire à la troisième dans sa démarche, en s'intéressant cette fois à la possibilité d'alerte très rapide pour des séismes proches, en ne traitant que des signaux courts provenant d'un réseau de stations régionales. Les problèmes et solutions spécifiques à cette configuration sont exposés et discutés. Les résultats obtenus au Japon et au Mexique sont extrêmement encourageant et permettent d'envisager une alerte 6 minutes après le temps-origine du séisme pour peu qu'on dispose d'un réseau régional suffisant et des moyens de calcul adéquats.

La cinquième partie, basée sur un article (soumis), constitue un développement encore plus original. Elle traite des erreurs et incertitudes dans les inversions, et plus particulièrement dans celle mise en œuvre dans cette thèse. Il y est clairement montré comment une bonne prise en compte de la non-indépendance des données et des imperfections de la théorie permet non seulement d'obtenir des estimations plus réalistes des incertitudes sur les paramètres, mais également d'améliorer la qualité de la solution elle-même. En particulier, les séismes « contaminés » (dont le signal est perturbé par les ondes d'un précédent séisme), fréquents après un événement majeur, bénéficient beaucoup de cette approche novatrice qui permet de les caractériser aussi rapidement et avec la même fiabilité que les autres.

La méthode à la base de ce travail de thèse étant déjà publiée et validée sur quelques très grands séismes avant le début de la thèse, on pouvait craindre que son contenu soit purement applicatif et sans grande originalité. Tout en menant à bien ce côté applicatif de manière brillante en produisant un code opérationnel qui est maintenant en service dans les principaux centres d'alerte, Zacharie Duputel a su faire preuve d'autonomie en apportant des solutions originales aux problèmes rencontrés, et surtout, à mon sens, en traitant de façon très soignée la question des erreurs et incertitudes, ce qui a finalement renforcé la qualité et la fiabilité des solutions, et permettra sans doute d'étendre encore le domaine où la méthode est applicable. L'évolution de l'algorithme au cours de ces trois années montre le souci de Monsieur Duputel de ne pas laisser sans remède un défaut constaté, et la maîtrise à laquelle il est parvenu pour diagnostiquer et remédier. Cette maîtrise n'a pu être atteinte que grâce à une assimilation très en profondeur des fondements de la sismologie, et en particulier de ce qu'est une phase W et de comment fonctionne une source sismique.

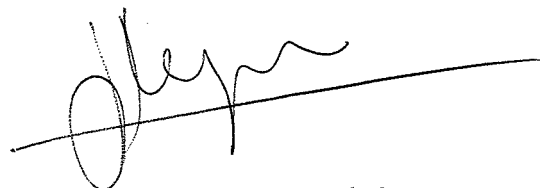
Pour être complet, je dois mentionner que cette thèse est également remarquable sur le plan de la forme, sa qualité syntaxique et orthographique étant quasi-irréprochable. On peut éventuellement regretter que le texte contienne un grand nombre de redites qui contribue à augmenter la taille du document sans nécessité. Je n'ai également relevé que peu d'erreurs (que j'espère uniquement typographiques) dans les équations (2.4, 2.9, 2.21, 5.6). Ces erreurs auraient toutefois pu être facilement évitées par quelques contrôles simples au moment de la rédaction, comme la vérification de l'homogénéité des dimensions ou l'application à un cas particulier dont on connaît la solution.

L'impression d'ensemble qui se dégage à la lecture de ce mémoire est extrêmement positive: on comprend bien le problème posé, les difficultés rencontrées, et les résultats obtenus. Le travail réalisé est important et de grande qualité. Le cheminement a été mené à son terme en aboutissant à un produit opérationnel, très apprécié au niveau international dès sa première

version, ayant fait l'objet de plusieurs améliorations importantes depuis, et ayant grandement contribué au progrès de l'alerte aux séismes et aux tsunamis.

Je considère donc qu'il s'agit là d'une thèse de tout premier plan, remarquable à bien des égards, qui mérite sans aucun doute d'être soutenue.

Strasbourg, le 29 octobre 2011

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'J' followed by a series of loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Jean-Jacques Lévêque