



HAL
open science

Estimation des paramètres de source par inversion spectrale pour la sismicité de l'arc Antillais : cas de la crise des Saintes

Agnès Chounet, Marie-Paule Bouin, Claudio Satriano

► **To cite this version:**

Agnès Chounet, Marie-Paule Bouin, Claudio Satriano. Estimation des paramètres de source par inversion spectrale pour la sismicité de l'arc Antillais : cas de la crise des Saintes. Institut de physique du globe de paris - IPGP. 2013. hal-03965701

HAL Id: hal-03965701

<https://hal.science/hal-03965701>

Submitted on 31 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Estimation des paramètres de source par inversion spectrale
pour la sismicité de l'arc Antillais :
cas de la crise des Saintes.

Encadrants : Marie-Paule Bouin et Claudio Satriano - IPGP,
équipe de Sismologie

Agnès Chounet

Avril - Juillet 2013

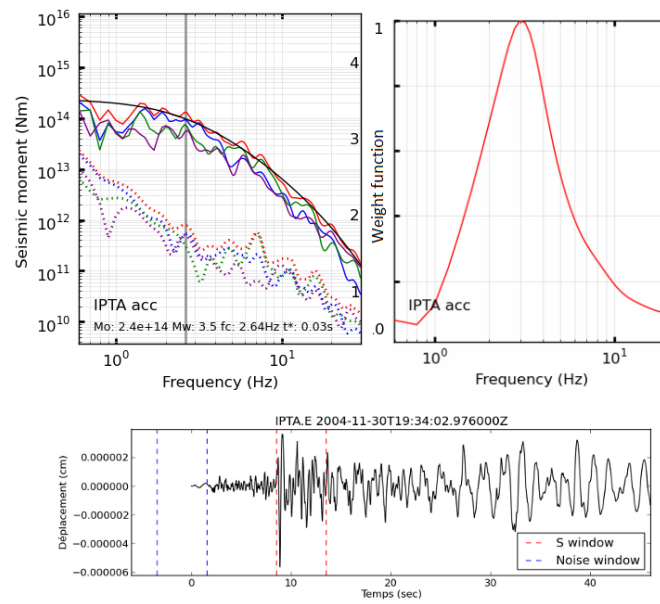


Table des matières

1	Introduction	3
2	Données : la crise des Saintes	7
3	Méthode et traitement des données	7
3.1	Méthode d'inversion spectrale <i>source spec</i>	7
3.2	Traitement des données et paramétrisation	9
3.2.1	Filtrage des données	10
3.2.2	Sélection de la fenêtre d'ondes S	12
3.2.3	Fonction de pondération	13
4	Résultats	14
4.1	Inversion sans bornes aux paramètres	14
4.1.1	Résultats de l'inversion	14
4.1.2	Résidus par stations	20
4.2	Inversion avec correction de stations	20
4.2.1	Correction des effets de station	20
4.2.2	Distribution du facteur de qualité	24
4.3	Inversion avec contraintes sur le facteur de qualité Q_o	24
4.3.1	$Q_o = 150$	24
4.3.2	$Q_o = [600, 800]$	25
5	Discussion et conclusion	28
6	Appendice	30
	Références	31

1 Introduction

L'analyse de la sismicité d'une région géodynamique active est essentielle à la compréhension de son fonctionnement, et la détermination de paramètres physique caractérisant la source sismique . La magnitude de moment (Mw) qui caractérise l'énergie libérée lors de la rupture, et la fréquence coin (f_c) qui représente l'inverse de la durée de la source et caractérise donc sa taille, sont les paramètres physiques caractérisant la source.

Le plongement des plaques Nord et Sud-Américaines sous la plaque Caraïbe, à un taux de convergence d'environ 2cm/an vers l'ouest-sud-ouest forme l'arc volcanique des Petites Antilles sur 650 km de long (carte figure 1).

Cette zone de subduction est le siège d'une sismicité relativement faible mais caractéristique du contexte : des séismes à l'interface de subduction et des séismes intermédiaires dans la plaque plongeante (comme le séisme de 2007 en Martinique), ainsi que des séismes crustaux dans la plaque chevauchante au niveau de l'arc volcanique sont régulièrement enregistrés par les réseaux mondiaux et régionaux.

Le faible niveau de la sismicité ainsi que la position lointaine des stations télésismiques rendent son analyse difficile, malgré la présence de réseaux locaux. Ainsi, la magnitude calculée aux Observatoires Volcanologiques et Sismologiques de Martinique et de Guadeloupe (OVSM et OVSG, respectivement) à partir des enregistrements des réseaux sismologiques locaux est une magnitude de durée et non une magnitude de moment.

Le 21 novembre 2004, un séisme de $Mw = 6.3$ a lieu dans le sud de la Guadeloupe, proche de l'archipel des Saintes, produisant une série de fortes répliques enregistrée par l'ensemble des réseaux locaux de Martinique et de Guadeloupe ([8]). Cette crise sismique a depuis fait l'objet de nombreuses études ([8], [4]). Les enregistrements du Réseau Accélérométrique Permanent de l'IPGP (RAP, voir figure 2) ont notamment fait l'objet d'une étude d'estimation des paramètres de source ([7]) par une méthode d'inversion conjointe des paramètres de source, de site, et d'atténuation.

Nous proposons ici de tester une méthode d'estimation des paramètres de source et d'atténuation à partir de l'analyse du spectre en déplacement des ondes S dans une inversion événement par événement sur le jeu de données utilisé par Drouet et al dans son étude. L'importance de la crise sismique et son enregistrement par un réseau accélérométrique proche des sources permettent cette analyse ; enfin nous nous appuyons sur les résultats de [7] pour regarder leur compatibilité et analyser les différences entre les deux méthodes.

Cette étude se fait dans l'optique d'une extension de cette méthode à l'échelle de la sismicité de l'arc Antillais ; si la géométrie de l'arc et le faible rapport signal/bruit sont des problèmes (notamment pour la localisation des événements) , la mise en commun des données des réseaux des îles Anglophones ouvre une perspective nouvelle à ce type d'analyses.

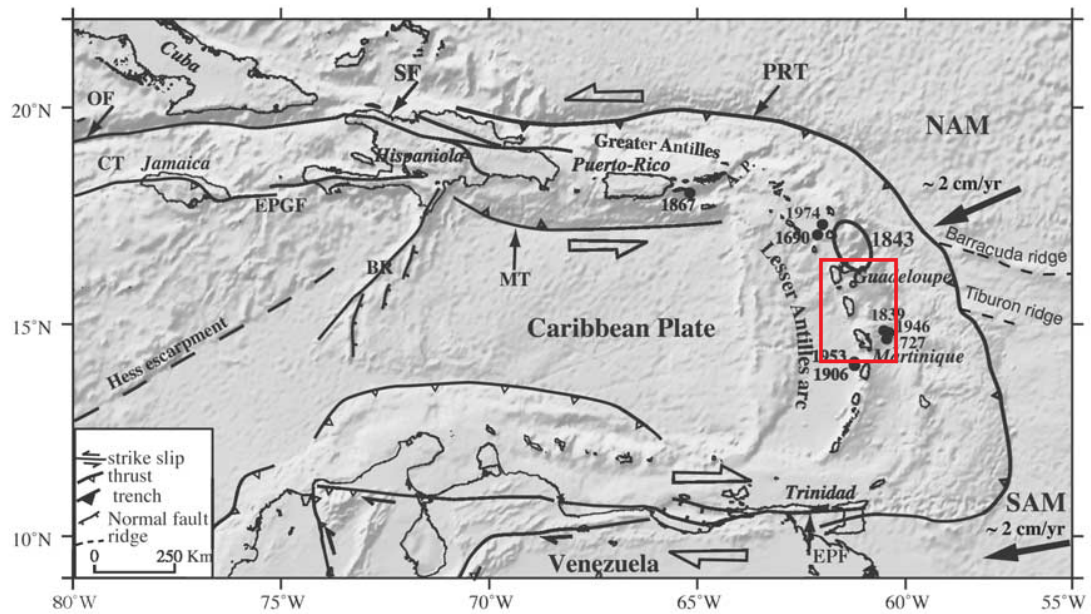


FIGURE 1: Carte sismotectonique de l'arc Antillais, d'après [8]. En rouge est représentée la zone d'étude, entourant les îles de la Guadeloupe et de la Martinique sur lesquelles se trouve le réseau du RAP.

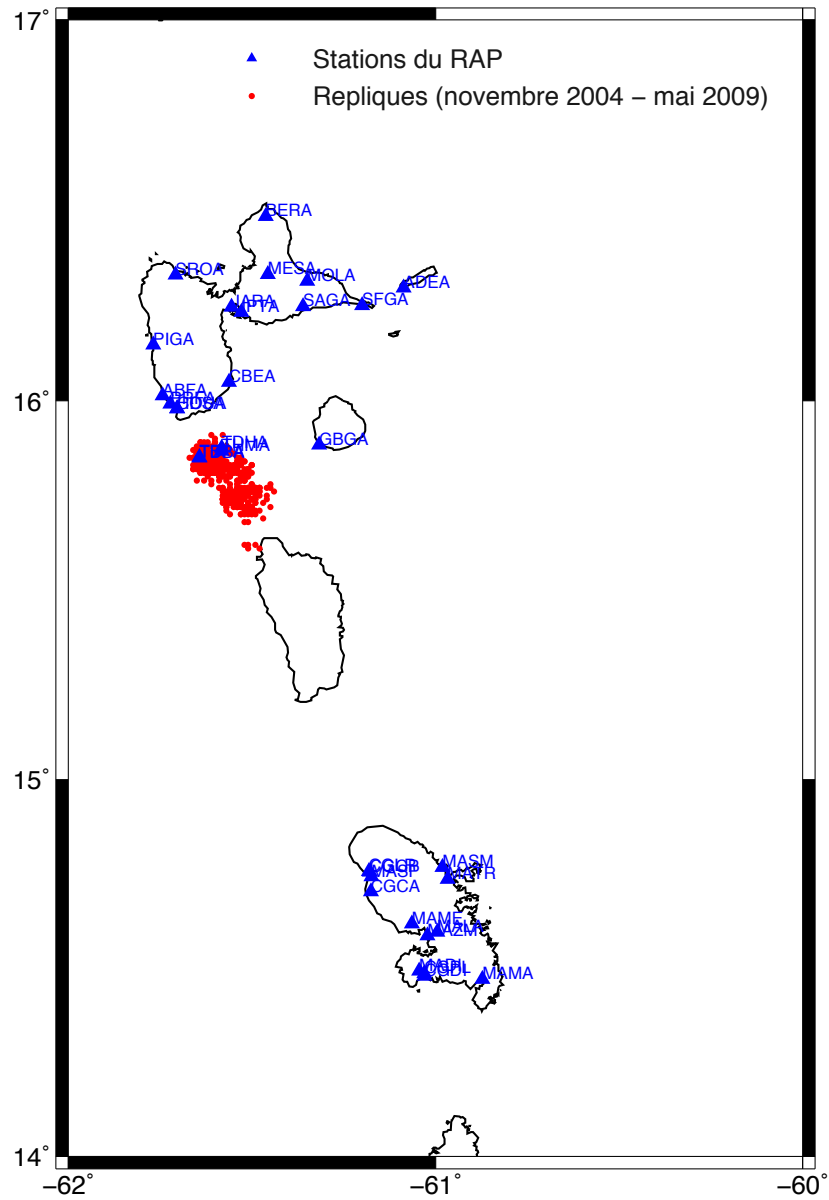


FIGURE 2: Épicentres du choc principal et des répliques de la crise des Saintes enregistrés de novembre 2004 à mai 2009 par le réseau local accélérométrique du RAP.

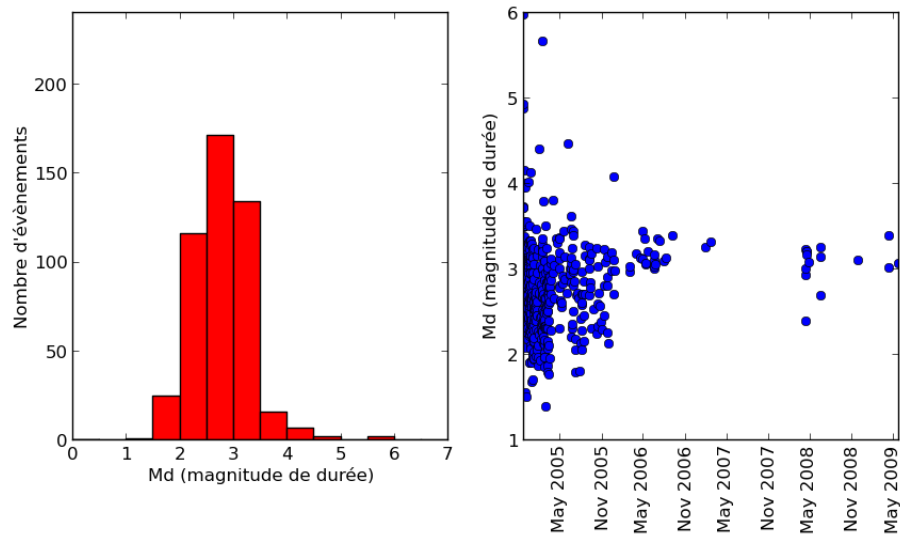


FIGURE 3: (gauche) Histogramme des magnitude de durée (M_d) du choc principal et de ses répliques enregistrés de novembre 2004 à mai 2009. De 2004 à 2005 toutes les répliques enregistrées par au moins 3 stations sont prises en compte, et de 2006 à 2009 seules les répliques de $M_d \geq 3$ enregistrées au moins par 3 stations sont prises en compte. (droite) Séquence temporelle des répliques sur le même jeu de données.

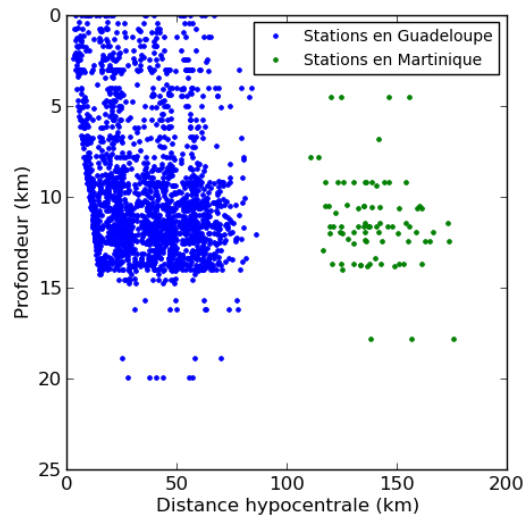


FIGURE 4: Profondeur des hypocentre en fonction des distances hypocentrales source-station. Les profondeurs sont contenues dans les 20 premiers km, et les distances hypocentrales sont comprises entre $14.8km$ et $175km$.

2 Données : la crise des Saintes

Le jeu de données est formé de l'ensemble des répliques analysées par [7], c'est à dire des répliques enregistrées entre 2004 et 2005 au minimum par trois stations, ainsi que des événements $M_d \geq 3$ enregistrés entre 2006 et 2009 également par trois stations minimum. La figure 3 montre la séquence temporelle de ces répliques ainsi que leur répartition par magnitude de durée : en ce qui concerne la période de 2004 et 2005, le seuil de complétude se situe à $M_d \simeq 2.0 - 2.5$; en ce qui concerne la période de 2006 à 2009, il est de $M_d = 3$. Les hypocentres des événements ont été localisés par les observatoires de Martinique et de Guadeloupe (OVSM et OVSG respectivement) dans le cadre du projet CDSA ([5]), et les épacentres sont visibles figure 2. Les répliques se concentrent dans une zone de $25km$ de long sur $10km$ de large et jusqu'à $20km$ de profondeur (figure 4), le long de la faille de Roseau, supposée avoir rompu lors du choc principal avec un mécanisme en faille normale ([8]). Les 30 stations accélérométriques (19 stations en Guadeloupe et 11 stations en Martinique) ayant enregistré la séquence sismique se trouvent à des distances hypocentrales comprises entre $14.8km$ et $175km$ (figure 4), hormis les 4 stations présentes sur l'archipel des Saintes (THMA, TDBA, TBPA et TDHA) distantes de $3km$ à $30km$ des sources (figure 2) et installées à la suite de la crise en À ces distances, les enregistrements sont considérés comme en champ lointain. La fréquence d'échantillonnage des accéléromètres est de $125Hz$, permettant l'enregistrement des petits événements ($M_d \leq 4$) qui constituent la majeure partie des données ici traitées. Une correction de plateau est appliquée pour convertir les enregistrements en cm/s^{-2} .

3 Méthode et traitement des données

La méthode d'estimation des paramètres de source que nous présentons ici a été développée pour étudier la sismicité régionale en Italie (dans les ..?..), ainsi que la sismicité du Golf de Corinthe en Grèce ([9]), et se base sur l'analyse spectrale des ondes S en déplacement.

3.1 Méthode d'inversion spectrale *source spec*

Le spectre de Fourier du champ de déplacement des ondes S en champ lointain ($S(f)$) peut être modélisé en domaine spectral par le produit du terme de source, décrit par le modèle de Brune ([2]), et d'un terme de propagation (atténuations géométrique et anélastique des ondes dans le milieu) :

$$S(f) = \left(M_o \times \frac{2R_{\Theta\Phi}}{4\pi\rho\beta^3} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \right) \times \left(\exp\left(\frac{-\pi r f}{Q_o V_s}\right) \frac{1}{r} \right), \quad (1)$$

où f est la fréquence, r la distance hypocentrale, M_o le moment sismique, f_c la fréquence coin ; $R_{\Theta\Phi} = 0.55$ le coefficient de radiation pour les ondes S (supposé constant, voir [1]), $\rho = 2800 kg/m^3$ la densité moyenne du milieu, β et V_s respectivement la vitesse des ondes S à la source et la vitesse moyenne des ondes S le long du chemin considérées

égales $\beta = V_s = 3.5$ (d'après [3] et [4]), et Q_o le facteur de qualité.

$S(f)$ est l'amplitude à la fréquence f du spectre de Fourier des ondes S d'un événement à une station donnés. L'énergie des ondes S est au premier ordre répartie sur les composantes horizontales du déplacement (nord-sud et est-ouest), mais pour les distances hypocentrales que nous regardons, relativement proches, une part non négligeable de l'énergie se retrouve dans la composante verticale. Ainsi, $S(f)$ est calculé comme la somme des 3 composantes du déplacement, soit en \log_{10} : $\log_{10}(S(f)) = \log_{10}(S^{nord-sud}(f)) + \log_{10}(S^{est-ouest}(f)) + \log_{10}(S^{vert}(f))$.

Il vient :

$$\log_{10}(S(f)) = \log_{10} \left(M_o \times \frac{2R_{\Theta\Phi}}{4\pi\rho\beta^3} \right) + \log_{10} \left(\frac{1}{1 + (\frac{f}{f_c})^2} \right) + \log_{10} \left(\exp \left(\frac{-\pi r f}{Q_o V_s} \right) \frac{1}{r} \right). \quad (2)$$

Le premier terme contient le moment sismique relié à la magnitude de moment M_w , d'après [?] par la relation : $M_w = \frac{2}{3}(\log_{10}(M_o) - 9.1)$; il correspond à la valeur du plateau formé aux basses fréquences du spectre. Le deuxième terme $\log_{10} \left(\frac{1}{1 + (\frac{f}{f_c})^2} \right)$ décrit la décroissance en f^{-2} du spectre où la fréquence coin f_c marque le début de cette décroissance; le troisième terme décrit l'atténuation géométrique des ondes en $\frac{1}{r}$, et l'atténuation anélastique des ondes $\exp \left(\frac{-\pi r f}{Q_o V_s} \right)$, caractérisée par le facteur de qualité Q_o , d'autant plus faible que le milieu atténue les ondes. On introduit, car plus stable dans l'inversion, un paramètre t_* , défini par :

$$t_* = \frac{r}{Q_o V_s}, \quad (3)$$

qui caractérise l'atténuation du milieu. Dans ce cadre, le spectre en déplacement des ondes est donc modélisé par 3 paramètres : 2 paramètres de source M_w et f_c , et un paramètre de propagation t_* . L'équation 2 peut être réécrite en fonction de ces trois paramètres, en unité de M_w :

$$Y^{synth} = M_w + \frac{2}{3} \left(\log_{10} \left(\frac{1}{1 + (\frac{f}{f_c})^2} \right) + \log_{10} (\exp(-\pi t_* f)) \right), \quad (4)$$

avec

$$Y^{synth} = \frac{2}{3} \times \left(\log_{10} \left(r \times \frac{4\pi\rho\beta^3}{2R_{\Theta\Phi}} \times S(f) \right) - 9.1 \right). \quad (5)$$

$$(6)$$

Par ailleurs, seuls les spectres dont le rapport rms *signal/bruit* ≥ 3 sont pris en compte dans la combinaison du spectre résultant.

L'inversion est effectuée sur chaque spectre (donc indépendamment pour chacune des stations ayant enregistré un événement donné) par méthode de Newton tronquée. Dans ce cadre, la fonction de coût à minimiser pour chaque station a la forme :

$$f(\mathbf{m}) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{w_i}{\sum_j w_j} (y_i - y_i^{synth}(\mathbf{m}))^2 \right)} \quad (7)$$

où $\mathbf{m} = (M_w, f_c, t_*)$ est le vecteur de paramètres, y_i et $y_i^{synth} = \log_{10}(S(f_i))$ sont respectivement les valeurs du spectre des données et du spectre synthétique à la fréquence f_i . Chaque composante est pondérée d'un facteur

$$w_i = \left(\frac{y_i}{n_i} \right) / \left(\frac{y}{n} \right)_{max} \quad (8)$$

où n_i est la valeur du spectre du bruit mesurée sur la même trace à la fréquence f_i . Les paramètres initiaux sont fixés au départ de chaque inversion. M_w^i est calculée comme la moyenne des 5 premières valeurs du spectre, f_c^i est déduite de la relation d'échelle entre M_w et f_c prédite par le modèle de Brune,

$$f_c^i = V_s \sqrt[3]{\Delta\sigma 10^{-(1.5M_w^i + 9.1) - 0.935}}, \quad (9)$$

avec $\Delta\sigma = 5$ MPa la chute de contrainte supposé constant.

La valeur initiale $t_*^i = 0.01$ secondes a été fixée et correspond à une valeur réaliste de ce paramètre. La sensibilité de l'inversion aux paramètres initiaux a été testée pour les trois paramètres : en ce qui concerne la magnitude et le t_* , l'inversion est stable et converge vers la même solution pour différentes valeurs de ces paramètres. En revanche, différentes valeurs de f_c^i peuvent modifier l'estimation des paramètres f_c et t_* , fortement couplés comme nous le verrons par la suite ; en ce sens la valeur de la fréquence coin initiale f_c^i doit être relativement proche de sa véritable valeur.

Les 3 paramètres ici considérés ne sont pas également contraints dans l'inversion ; ainsi, le t_* affecte principalement la chute haute-fréquence du spectre, en l'atténuant au delà de la décroissance en f^{-2} et l'incertitude sur la valeur de ce paramètre est plus grande que sur les deux autres. D'autre part, il y a un couplage important entre le t_* et la fréquence coin, et pour limiter le caractère non unique de la solution, il est possible de borner l'intervalle de recherche des paramètres. Nous avons donc eu recours à une approche en plusieurs étapes dans laquelle des bornes définies a posteriori permettent de limiter le champ de recherche sur l'ensemble des paramètres (voir parties 4 et 5).

3.2 Traitement des données et paramétrisation

Le passage d'un accélérogramme à un spectre en déplacement des ondes S nécessite un traitement (filtrage et sélection des données) qui varie avec la magnitude de l'événement dont le contenu fréquentiel, la durée de la source et le rapport *signal/bruit* en dépendent. Dans cette partie est détaillé le choix du filtrage et des fenêtres temporelles et fréquentielles

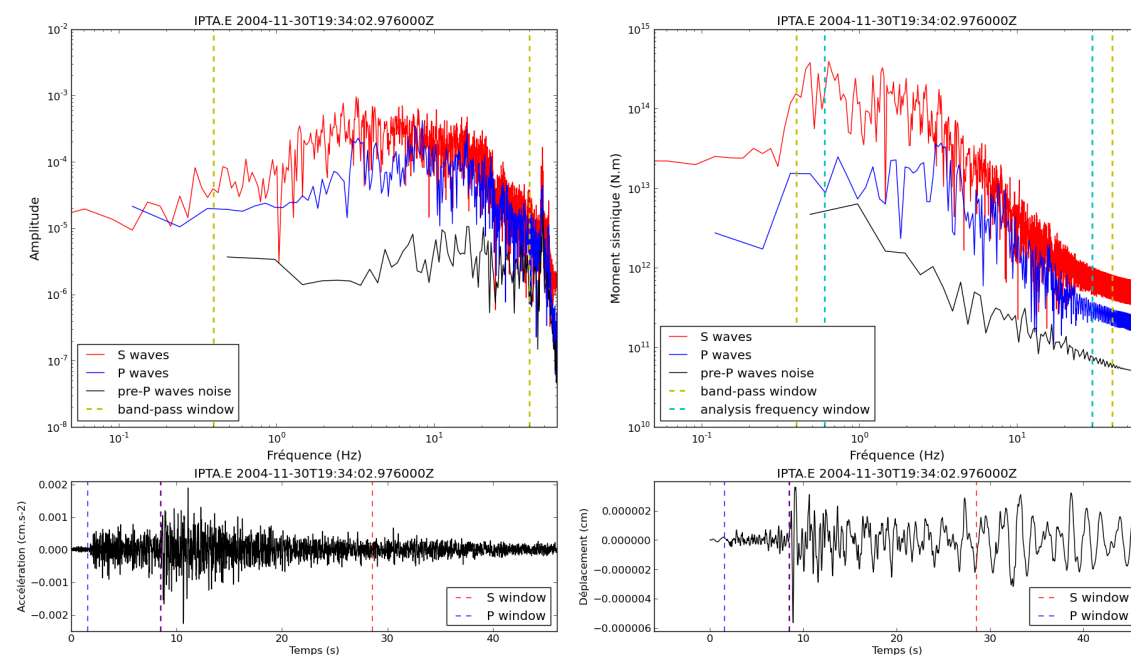


FIGURE 5: (gauche) Accélérogramme (composante est) à la station IPTA et le spectre associé. (droite) Déplacement après double intégration de la même trace, et spectre associé.

(ondes S et bruit) pour différentes classes de magnitude. Nous nous sommes appuyés pour cela sur les magnitudes de moment déterminées par [7] sur l'ensemble du catalogue. Mais il serait nécessaire de par la suite de déterminer directement des critères basés non pas sur la magnitude, mais sur le rapport *signal/bruit* de chaque trace.

3.2.1 Filtrage des données

Les traces sont intégrées deux fois en fréquence pour être converties en déplacement, et à chaque étape de l'intégration est appliqué un filtre passe-bande. On déduit les fréquences de coupure du filtre à partir du rapport *signal/bruit* des spectres d'événements de magnitude différente. Ainsi, figure 5, la trace en accélération (composante est) à la station IPTA pour l'événement 20041130-193355.10 ($M_w = 3.6$ selon [7]) est découpée en une zone de bruit pre-onde P, une zone d'ondes P, et une zone d'ondes S qui dure 20 secondes ; les 3 spectres sont représentés figure 5. Le spectre du bruit est plat, correspondant à un bruit gaussien, et se situe au moins un ordre de grandeur en dessous du spectre des ondes S et des ondes P, avant d'atteindre aux hautes et basses fréquences une valeur du même ordre que le spectre d'ondes S ; on fixe ici les limites inférieure et supérieure du filtre passe-bande (respectivement $f_{min} = 0.4Hz$ et $f_{max} = 40.0Hz$ dans cet exemple).

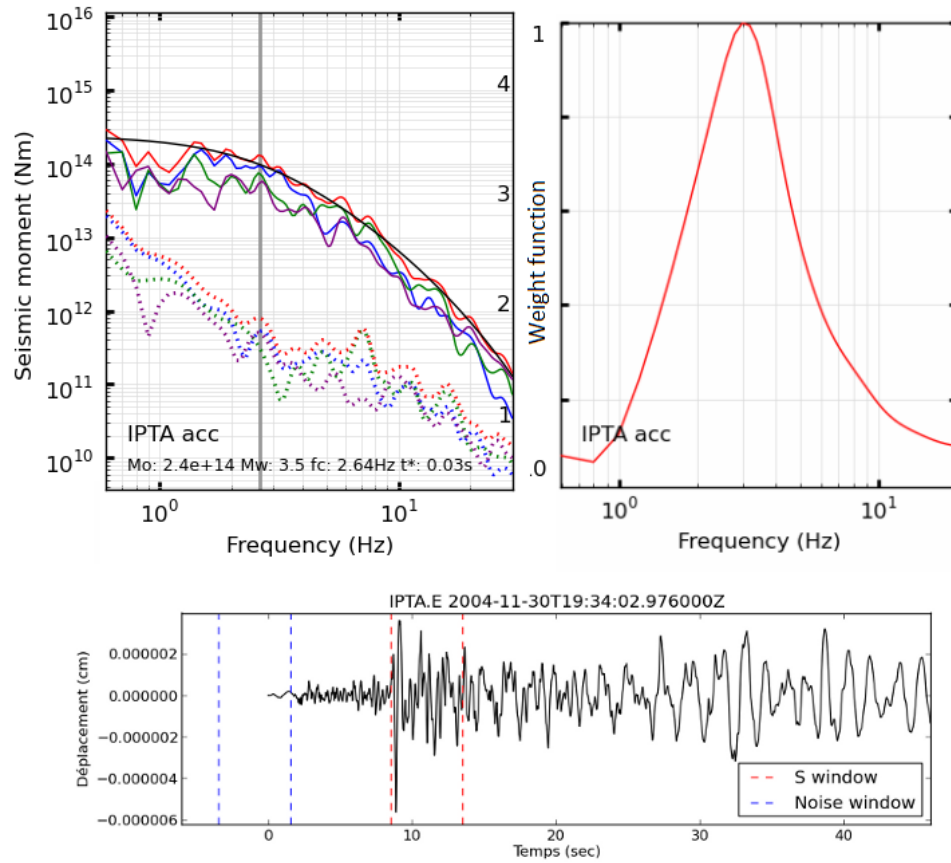


FIGURE 6: Exemple d'inversion pour l'événement 20041130-193355.10 à la station IPTA. (gauche) Spectres résultant (rouge) et des trois composantes horizontales (bleu et vert) et verticale (violet) des ondes S (ligne pleine) et du bruit (ligne pointillée), après double intégration et filtrage entre $[0.4Hz, 40.0Hz]$. Spectres construits à partir de 5 secondes de traces; l'inversion est faite sur le spectre résultant, dans une fenêtre $[0.6Hz, 30.0Hz]$. (droite) Fonction de poids associée (voir équation 8). (bas) Trace de la composante est en déplacement, et sélection des fenêtres d'ondes S et du bruit pour la construction des spectres.

L'amplification du bruit à haute fréquence correspond à la réponse instrumentale et la limite sera la même pour tout le catalogue ($f_{max} = 40.0 Hz$).

Après intégration, la trace en déplacement correspondante (figure 5, à droite) montre que l'amplitude pre-signal est suffisamment (moins d'1/4) inférieur au signal. Le spectre du déplacement (normalisé à la distance hypocentrale et converti en moment sismique) montre un plateau basse fréquence puis une chute en f^{-2} compatible avec les modèles; le spectre du bruit reste toujours inférieur à celui du signal.

Un événement de plus faible magnitude a une amplitude spectrale plus faible et son contenu spectral se déplace vers les hautes fréquences. Ces deux caractéristiques ont pour effet de réhausser la limite basse fréquence du filtre, et de réduire la fenêtre fréquentielle. Ainsi, on passe d'une fenêtre de filtrage de $[0.1 Hz, 40 Hz]$ pour les événements de $Mw \geq 4.7$ à une fenêtre de $[1 Hz, 40 Hz]$ pour les plus petits événements ($Mw \leq 3.2$). Les bornes de filtrage, définies à partir de l'étude d'une vingtaine d'événements représentant le catalogue, sont récapitulées tableau 1.

Mw ([7])	Largeur du filtre passe-bande. $f_{min}, f_{max}(Hz)$	Durée $T(s)$ de la fenêtre d'ondes S	Fenêtre du spectre d'ondes S. $f_{min}, f_{max}(Hz)$	Durée $T(s)$ de la fenêtre de bruit
≥ 4.7	0.1 40.0	10.0	0.2 30.0	10.0
≥ 4.3	0.2 40.0	10.0	0.4 30.0	10.0
≥ 4.0	0.4 40.0	10.0	0.6 30.0	10.0
≥ 3.6	0.4 40.0	5.0	0.6 30.0	5.0
≥ 3.4	0.4 40.0	2.5	0.8 30.0	2.5
≥ 3.2	0.8 40.0	2.5	1.0 30.0	2.5
$3.2 \geq$	1.0 40.0	2.5	1.2 30.0	2.5

TABLE 1: Tableau des paramètres de traitement utilisés pour différentes familles de magnitude.

3.2.2 Sélection de la fenêtre d'ondes S

Le spectre est sensible à la longueur de la fenêtre temporelle d'ondes S sélectionnée. Quelle part des ondes S est représentative de la source? [7] considèrent 80% de l'énergie entre la première arrivée d'ondes S et la fin de la trace. Simplement, les phases tardives résultent souvent d'effets complexes liés à la propagation ou à des effets locaux, et les inclure peut rendre le spectre plus difficile à interpréter et moins représentatif de la source.

On estime la taille de la fenêtre temporelle à partir de l'observation des traces en déplacement obtenues après filtrage; pour un même événement, cette durée sera variable, notamment entre les stations de Martinique et celles de Guadeloupe; une durée

moyenne est considérée. Dans l'exemple, on a choisi une fenêtre de 5 secondes d'ondes S pour cette gamme de magnitude (en rouge figure 6) ; après 5 secondes, le contenu du signal apparaît plus basse fréquence, et nous considérons que l'essentiel de l'information sur la source est contenue dans ces 5 premières secondes. Nous avons regardé l'effet de l'usage d'une plus large fenêtre temporelle sur les résultats de l'inversion, par exemple, pour une fenêtre de 5 secondes au lieu de 2.5 secondes ($Mw < 3.6$), des trois paramètres seule la magnitude apparaît modifiée par une augmentation de $\simeq 0.1$ ordre de magnitude.

Le choix du filtrage et de la fenêtre temporelle des ondes S conditionne celui de sa fenêtre fréquentielle. La fenêtre fréquentielle de l'analyse doit être plus réduite que celle du filtrage, en raison de la décroissance due au filtrage (figure 5). De plus, la fréquence la plus basse de cette fenêtre doit être supérieure ou égale à $\frac{1}{T}$, pour une fenêtre temporelle T.

Par ailleurs, dans le cas de la séquence des Saintes, il est observé, à différentes stations et pour la plupart des événements, une amplification autour 0.15 Hz (voir [6]) ; on distingue clairement ces phases à la suite des ondes S dans les traces. Elles peuvent résulter d'un effet de source (voir [10]) ou de propagation, il serait d'ailleurs intéressant d'en déterminer l'origine, mais ceci sort du cadre de ce travail, et par la suite nous regarderons des fréquences supérieures à 0.2 Hz.

Figure 5, en bleu sur les spectres est représentée la fenêtre fréquentielle de l'analyse, de $[0.6Hz, 30.0Hz]$ dans cet exemple.

3.2.3 Fonction de pondération

Chaque spectre est pondéré dans l'inversion par le spectre du bruit, calculé comme la fenêtre de longueur T (longueur de la fenêtre d'ondes S) précédant l'onde P. Cependant, la longueur de trace précédant l'onde P varie d'une trace à l'autre et peut être inférieure à T (comme c'est le cas figure 5) ; dans ce cas, le spectre du bruit est calculé en allongeant la trace de bruit à la longueur T par des valeurs nulles.

Une autre possibilité est d'inclure les ondes P dans le bruit, puisque la coda d'ondes P peut polluer le spectre d'ondes S. Simplement, l'amplitude de l'onde P dans les ondes S n'est pas connue, et est variable d'une trace à l'autre, c'est pourquoi nous avons choisi un bruit pre-signal. La fonction de poids, visible (figure 6) est calculée comme le rapport normalisé des spectres du signal et du bruit (équation 8) et montre un pic autour de la fréquence coin. L'effet de cette fonction de poids sur l'inversion reste néanmoins du 2nd ordre. Les différents paramètres de traitement sont récapitulés dans le tableau 1.

Figure 6 montre le résultat de l'inversion dans *source spec* dans l'exemple considéré ici, à la station IPTA. Le spectre (en rouge) est bien ajusté par la courbe du modèle (en noir) dont les valeurs des paramètres sont cohérentes et compatibles à celles obtenues par [7] (i.e. $(Mw, f_c, t_*) = (3.5, 2.64, 0.03)$ dans *source spec*, $(Mw, f_c, t_*) = (3.6, 3.57, 0.06)$ pour [7]), exceptée la valeur du t_* . Les deux méthodes, dont les différences de modélisations peuvent expliquer ces résultats, sont discutées par la suite.

4 Résultats

Le traitement du signal et le choix des paramètres physiques d'entrée une fois définis, l'inversion a été effectuée sur l'ensemble des données. L'évaluation et la discussion de ces résultats reposent sur trois critères principaux : la compatibilité de nos résultats avec ceux trouvés par [7], la validité de ces résultats par l'observation directe des spectres, et enfin la cohérence des résultats sur l'ensemble du catalogue.

Différentes inversions ont été réalisées : l'usage d'intervalles bornés pour l'inversion des paramètres et l'usage ou non de corrections de stations sont récapitulés dans le tableau 2.

Inversion	Mw	Fréquence coin f_c (Hz)	Atténuation	Corrections de station
n°1	-	$0.0 \leq f_c \leq 30.0$	$t_* \geq 0$	-
n°2	-	$0.0 \leq f_c \leq 30.0$	$t_* \geq 0$	correction
n°3	-	$0.0 \leq f_c \leq 30.0$	$Q_o = 150$	-
n°4	-	$0.0 \leq f_c \leq 30.0$	$600 \leq Q_o \leq 800$	-
n°5	-	$0.0 \leq f_c \leq 30.0$	$600 \leq Q_o \leq 800$	correction

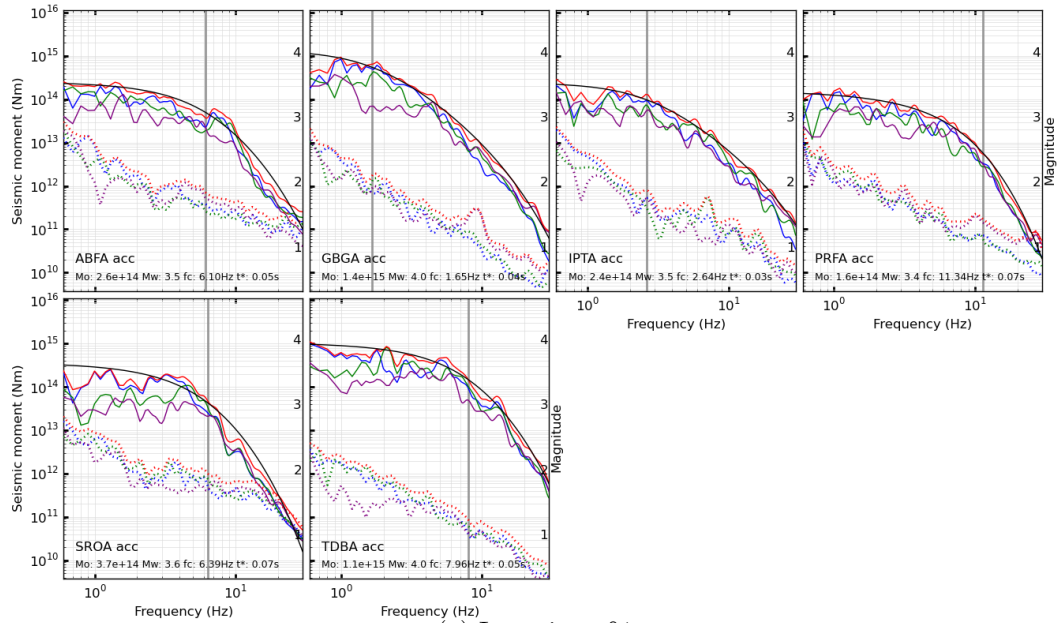
TABLE 2: Caractéristiques des 5 inversions présentées ici. Des bornes aux paramètres ont été utilisées pour contrôler les valeurs du facteur de qualité (inversions n°3 à n°5), et une correction des effets de station a été appliqué dans un deuxième stade de l'inversion (inversions n°2 et n°5). Les fréquences coins ont été contenues dans l'intervalle $[0 Hz; 30 Hz]$ pour éviter des valeurs au delà de la limite haute fréquence des spectres. Des contraintes de positivité sont appliquées au t_* et à la fréquence coin.

4.1 Inversion sans bornes aux paramètres

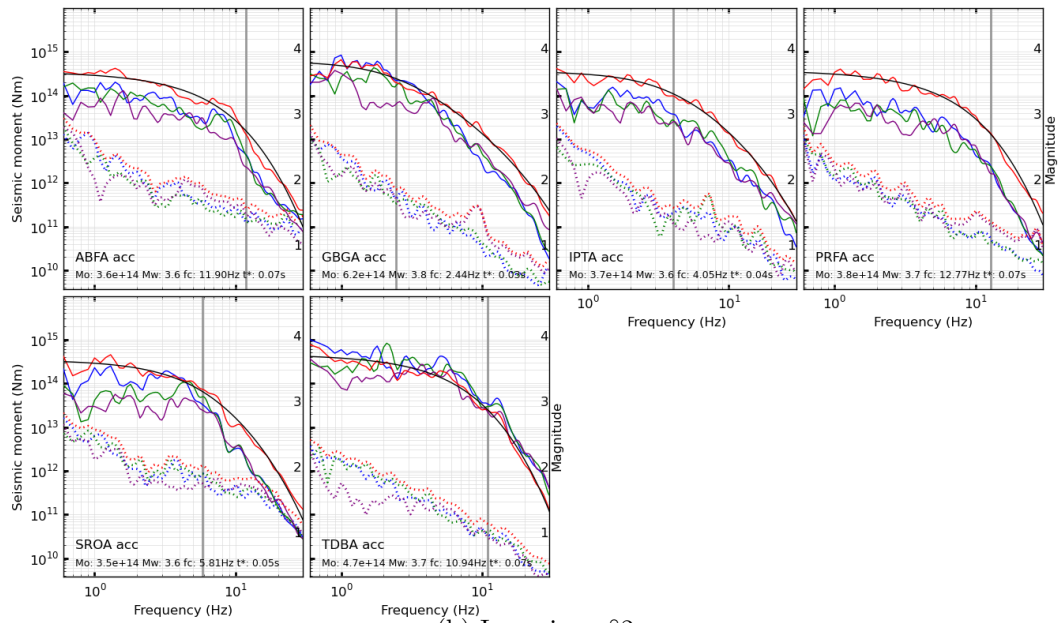
4.1.1 Résultats de l'inversion

Nous avons procédé à une première inversion sur l'ensemble du catalogue (table 2, inversion n°1) sans appliquer de contraintes autres que la positivité de f_c et t_* , et la limite haute fréquence de f_c (la fréquence maximale des spectres, $30 Hz$).

Figure 7a est représentée l'inversion spectrale de toutes les stations ayant enregistré l'événement 20041130-193355.10. Chaque spectre est ajusté correctement par le modèle, et un modèle moyen donne les paramètres : $(M_w, f_c, t_*) = (3.65 \pm 0.23, 6.89 \pm 3.12 Hz, 0.025 \pm 0.012 s)$. On a une très forte dispersion des valeurs de la fréquence coin et du t_* , ce qui est visible sur les spectres figure 7a : à certaines stations, la valeur de la fréquence coin est au delà du début de la décroissance du spectre (PRFA, et de manière moindre SROA et TDBA), et est compensée par une forte valeur du t_* : l'atténuation du spectre est excessivement accommodée par l'effet de propagation par rapport à l'effet de source.



(a) Inversion n°1



(b) Inversion n°2

FIGURE 7: Inversion dans les configurations 1 et 2 pour l'événement 20041130-193355.10.

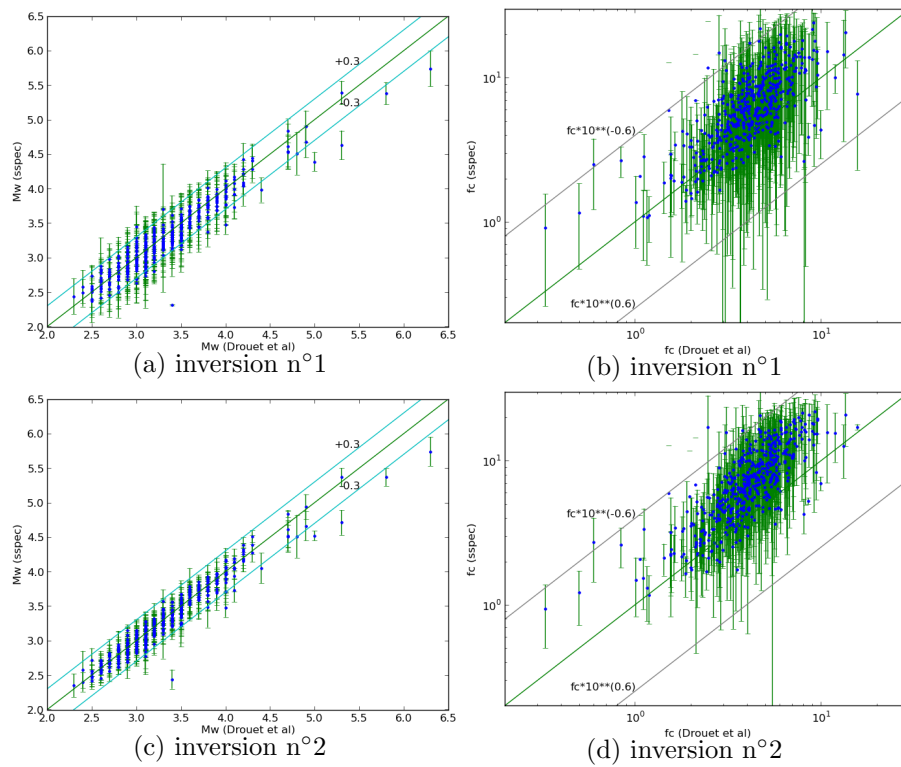
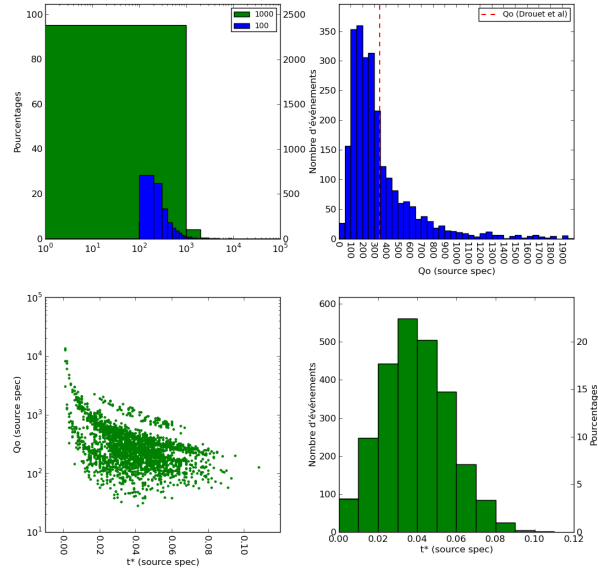
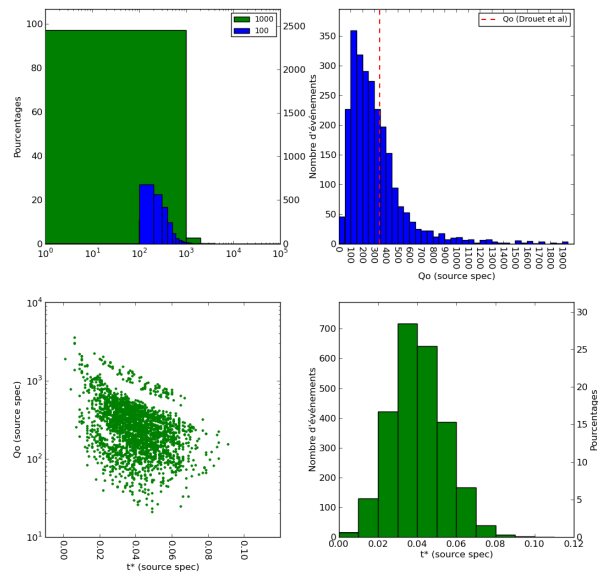


FIGURE 8: Comparaison des résultats à ceux de [7] pour l'ensemble du catalogue, pour les inversions n°1 et n°2.



(a) inversion n°1



(b) inversion n°2

FIGURE 9: Distribution de l'atténuation (t_* et Q_0) pour les inversions n°1 et n°2.

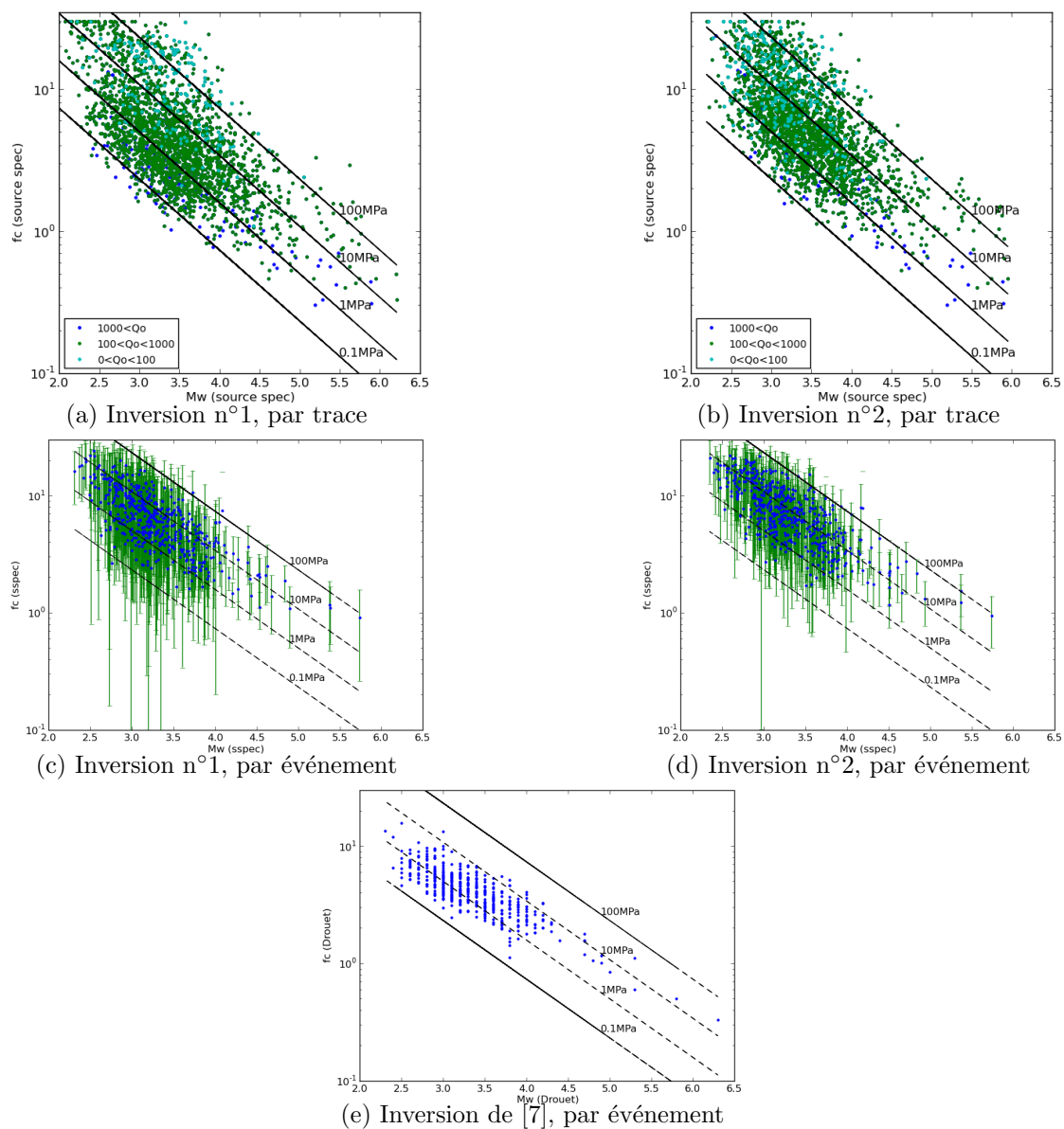


FIGURE 10: f_c en fonction de M_w pour les inversions n°1 et n°2 (voir table 2), ainsi que celle de [7]. (a) et (b) : valeurs obtenues pour chaque spectre. Les valeurs de f_c sont rangées en trois catégories dépendant de la valeur du facteur de qualité Q_o trouvée pour chaque inversion : $Q_o < 1000$, $100 < Q_o < 1000$, $Q_o < 100$. (c), (d) et (e) : valeurs moyennes obtenues pour chaque événement, et les barres d'erreur associées. Les lignes noires représentent la loi d'échelle entre f_c et M_w issue du modèle de Brune pour un $\Delta\sigma$ constant (de 0.1 MPa à 100 MPa).

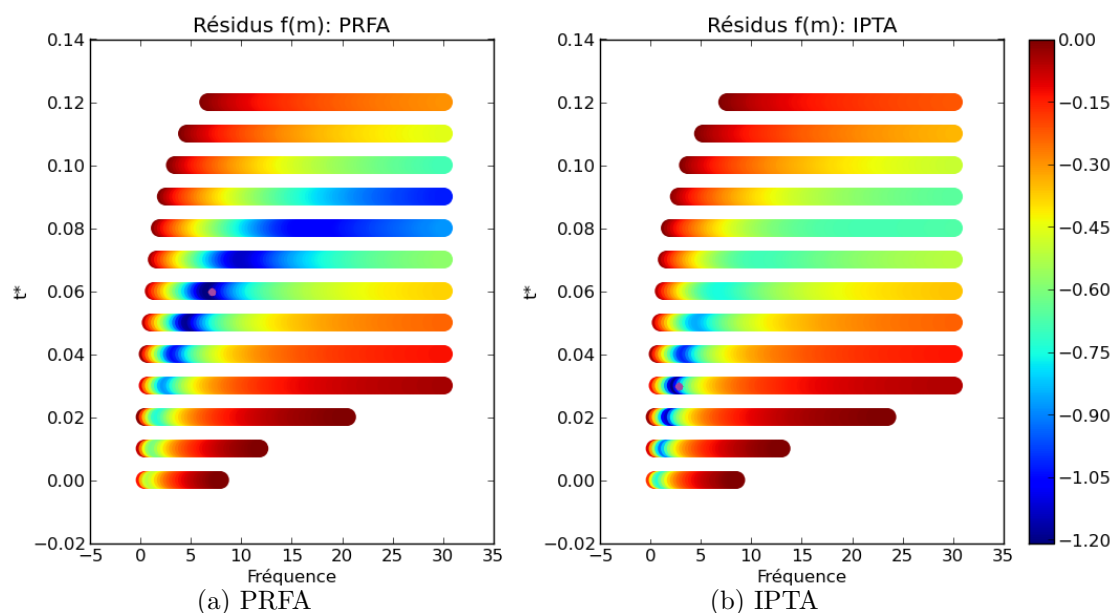


FIGURE 11: Distribution des résidus $\log(f(\mathbf{m}))$ aux stations PRFA et IPTA pour l'événement 20041130-193355.10, en fonction des paramètres f_c et t_* . Le point violet figure le minimum global de la fonction pour chaque station.

Sur l'ensemble du catalogue, dont les résultats sont reportés figure 8, l'estimation de la magnitude moyenne de chaque événement (figure 8a) est compatible avec les résultats de [7] dans une marge de ± 0.3 unité de magnitude, pour des $M_w \leq 5.0$. Par contre, pour les $M_w > 5.0$, on observe une sous-estimation de la magnitude supérieure à 0.3 unité. Notons que les magnitudes du choc principal et des 5 plus fortes répliques ont été fixées dans l'étude de [7] à partir des solutions CMT (Harvard CMT catalogue). Pour les plus grandes magnitudes, nous regardons des fréquences $f \geq 0.2$ Hz, et ce manque d'information basse fréquence ne permet peut être pas une bonne estimation de la magnitude. L'ensemble du catalogue comportant principalement des $M_w \leq 5.0$, se situe donc dans une bonne fenêtre fréquentielle.

L'estimation de la fréquence coin (figure 8b) montre, elle, une forte surestimation vis à vis des résultats de [7], ainsi qu'une dispersion des valeurs sur un ordre de grandeur. Après conversion du t_* , la distribution du facteur de qualité Q_o se concentre pour 50% entre 100 et 300, puis décroît graduellement jusqu'à 2000. Ces valeurs sont plus faibles que celles obtenue par [7] : $Q_o^{Drouet} = 345$, et impliquent une atténuation plus forte du milieu - à condition que les modélisations différentes permettent une comparaison directe.

La répartition des résidus ($\log(f(\mathbf{m}))$, équation 7) à une station donnée, en fonction de (f_c, t_*) , figure 11, montre que le minimum de la fonction se répartit continuellement sur un ensemble de valeurs de (f_c, t_*) ; les deux paramètres ayant chacun pour effet d'atténuer l'amplitude du spectre aux hautes fréquences, le minimum n'est pas unique. A la station

PRFA, le minimum se situe à $(6\text{Hz}, 0.06\text{s})$, et à $(3.5\text{Hz}, 0.03\text{s})$ pour IPTA, résultats en accord avec ceux de l'inversion figure 7a, où cependant, PRFA montrait une surestimation de f_c et de t_* . Ainsi, l'inversion retrouve bien le minimum global de la fonction ; mais cette fonction est affectée d'un trade-off entre ces deux paramètres, ce qui peut expliquer les valeurs obtenues de f_c .

Il est possible de réduire l'espace de valeurs recherchées de f_c en le resserrant autour de f_c^i ; simplement, la variabilité de la chute de contrainte $\Delta\sigma$ est du même ordre que les fluctuations observées de f_c (figure 10a) et ne permet donc pas de mieux contraindre f_c .

4.1.2 Résidus par stations

Par ailleurs, nous avons regardé la forme des résidus $d^{obs} - d^{synth}$ en fonction des stations lorsque nous disposons de plus de 20 enregistrements par station. Les résidus sont montrés figures 12 et 13 et concernent 13 stations de l'OVSG. Pour la plupart d'entre elles, on observe une cohérence entre les résidus d'une même station, dont la moyenne est représentative de leur ensemble. La moyenne des résidus peut être interprétée comme l'effet local de la station sur le spectre, s'ajoutant au terme de source et au terme de propagation. Par exemple, figure 7a, la station SROA montre clairement un pic à 4 Hz que nous retrouvons dans la courbe moyenne des résidus figure 12, où le pic atteint une amplitude de $\simeq 0.2$ unité de M_w . D'autres stations montrent des forts effets de site : JARA, THMA, CBEA. On remarque également la remontée observée à certaines stations (ABFA, JARA, IPTA, GBGA par exemple) pour $f \simeq 0.1 - 0.4$ Hz, que nous pouvons interpréter comme l'amplification observée autour de 0.15 Hz dans la séquence des Saintes ([6]).

Les conditions d'installation des différentes stations peuvent fournir une explication aux effets de site observés. En appendice, nous essayons d'établir un lien entre le site de la station, et les formes spectrales résiduelles observées, et notamment les variations du spectre sur les différentes composantes de la station.

Une 2^{nde} inversion est donc effectuée, dans laquelle une correction des spectres est appliquée par soustraction de ces résidus (inversion n°2, table 2).

4.2 Inversion avec correction de stations

4.2.1 Correction des effets de station

Figure 7b sont représentées les inversions des spectres non corrigés et corrigés pour l'événement 20041130-193355.10 ; figure 14a, pour l'événement 20050222-080217.57 à la station JARA, et figure 14b pour l'événement 20050227-092011.75 à la station THMA. Les spectres des stations JARA et SROA montrent avant correction un pic d'amplitude à $\simeq 2$ Hz et $\simeq 4$ Hz respectivement, également observés sur les spectres des résidus figure 12 ; la soustraction de ces pics, après correction, donne une forme des spectres plus régulière.

Concernant l'événement 20041130-193355.10, l'estimation des paramètres aux deux sta-

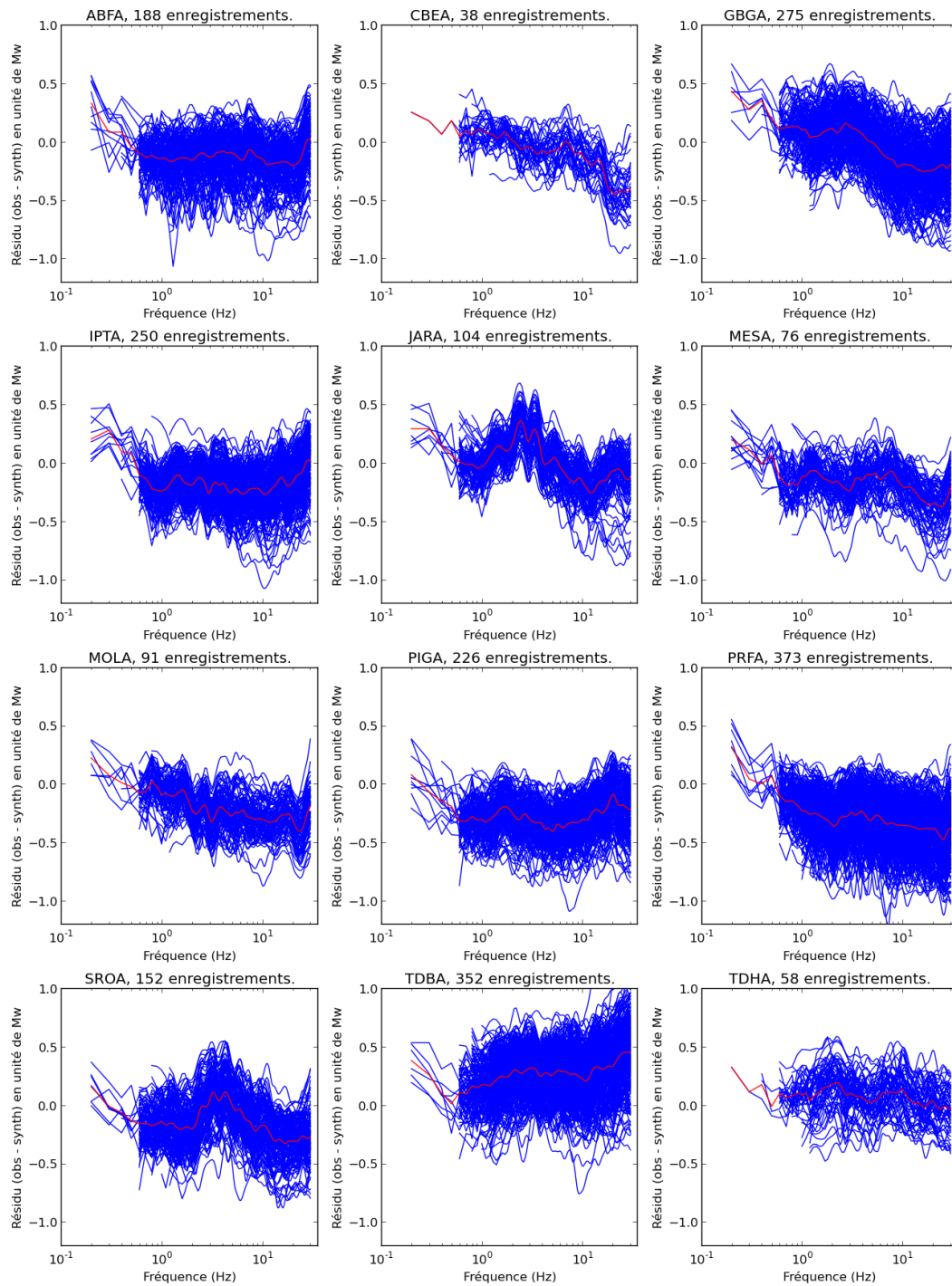


FIGURE 12: Résidus $d^{obs} - d^{synth}$, en unité de M_w , obtenus à la suite de l'inversion n°1, pour les stations ayant plus de 20 enregistrements. La ligne rouge est le spectre résiduel moyen pour chaque station.

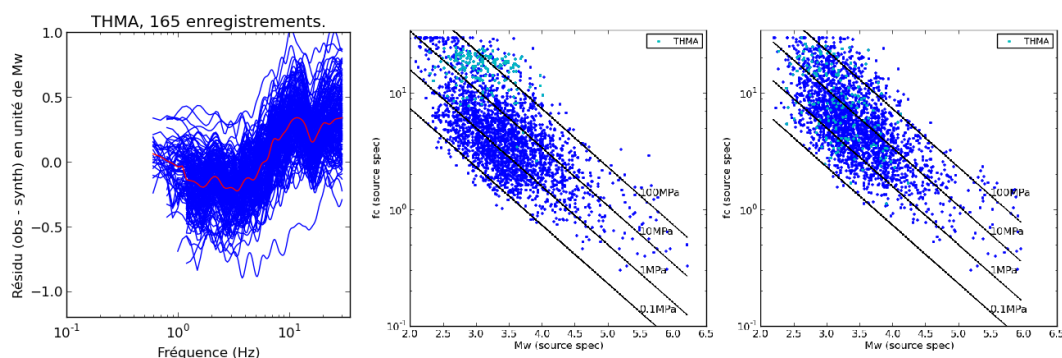


FIGURE 13: Résidus $d^{obs} - d^{synth}$, en unité de M_w (figure de gauche), obtenus à la suite de l'inversion n°1, à la stations. La ligne rouge est le spectre résiduel moyen pour chaque station. f_c en fonction de M_w , dans l'inversion n°1 (figure du milieu) et dans l'inversion n°2 (figure de droite), par spectre. En bleu clair, les résultats de la station THMA.

tions est plus homogène qu'auparavant, pour les trois paramètres. Notamment, la magnitude est abaissée pour GBGA où le spectre forme un plateau plus "plat" ; la fréquence coin de SROA est plus basse après correction du pic d'amplification. Dans les différents exemples, après correction du spectre, l'atténuation apparaît plus faible : en effet, dans les 4 cas, le t_* diminue de $\simeq 0.01 - 0.02$ secondes. Concernant JARA et THMA, l'estimation de la fréquence coin avant correction est très affectée par l'effet de site : à JARA, la fréquence coin est placée autour du pic d'amplification (2.89 Hz) mais est rétablie à plus hautes fréquences après correction ($f_c = 3.27$ Hz) ; tandis qu'à THMA, la fréquence coin est placée aux hautes fréquences ($f_c = 12.86$ Hz) juste à la suite d'une chute abrupte du spectre mais est rétablie à une plus basse fréquence après correction ($f_c = 4.82$ Hz).

Si on regarde l'ensemble des événements, figure 12 est montrée la relation f_c en fonction de M_w dans l'inversion n°1 en distinguant les résultats à la station THMA (bleu clair) : ils sont rassemblés autour d'une même valeur de fréquence coin ($\simeq 15 - 20$ Hz), et ce quelque soit la magnitude associée ; ceci n'est plus le cas après corrections, les valeurs de fréquence coin se répartissant sur l'ensemble des résultats.

La distribution des valeurs de M_w et f_c (figure 8) est plus resserrée qu'avant correction de stations. De même, figure 10 est représentée la distribution de f_c en fonction de M_w pour les inversions n°1 et n°2, pour chaque spectre (figures 10a et 10b), puis pour chaque événement (figures 10c et 10d), ainsi que les résultats par événement obtenus par [7] (figure 10e). D'une part, les valeurs de fréquence coin sont moins dispersées après correction de station, ce qui est visible pour l'ensemble des spectres inversés mais aussi pour l'ensemble des événements. D'autre part, figures 10a et 10b, les valeurs de f_c sont rangées en trois catégories en fonction de la valeur de Q_o : on remarque qu'avant correction, pour une même M_w , les fortes valeurs de f_c correspondent à de faibles valeurs du facteur de qualité ($0 < Q_o < 100$) et les plus basses correspondent aux plus fortes valeurs de Q_o ($1000 < Q_o$). Cette dépendance entre f_c et Q_o est à nouveau une évidence

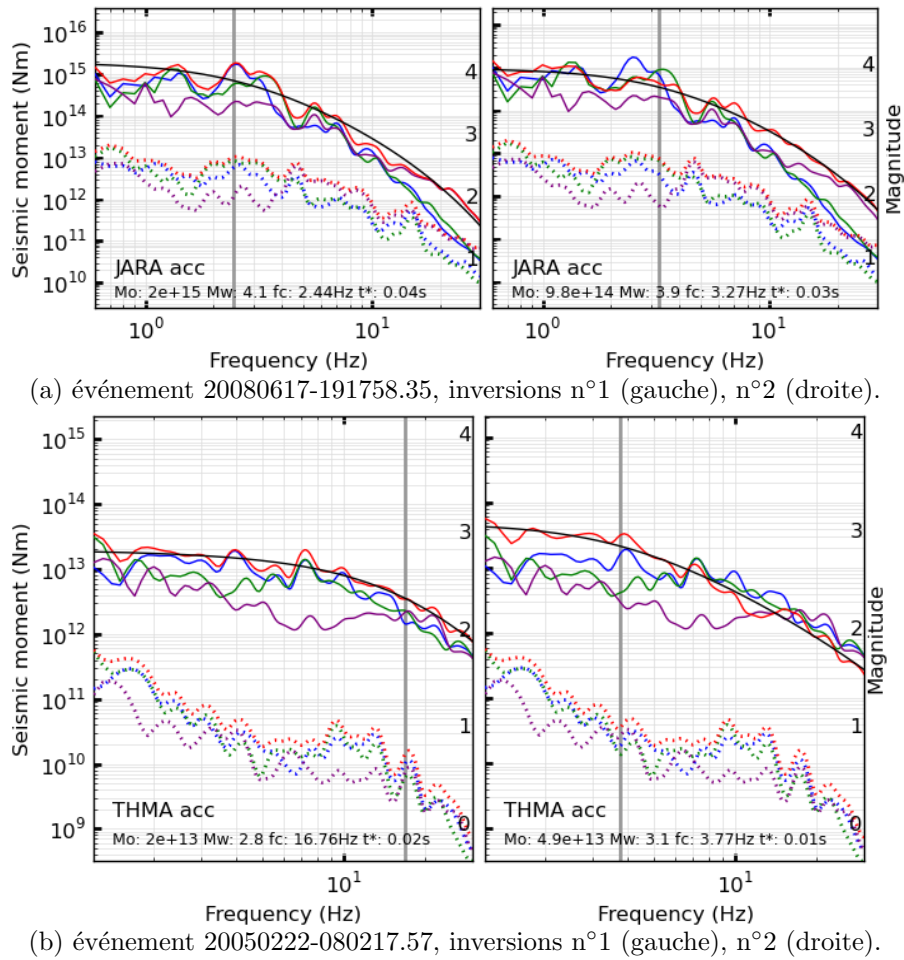


FIGURE 14: Effet de la correction de stations pour les stations JARA et THMA sur les spectres et l'inversion. Dans l'inversion n°2, seul le spectre résultant (en rouge) est corrigé dans l'inversion.

du trade-off entre ces deux paramètres. Après correction, cette tendance persiste, mais plus faiblement, notamment, les plus faibles valeurs de Q_o correspondent à une plus large gamme de valeurs de f_c .

Enfin, si nous comparons les résultats par événement à ceux de [7] (figures 10c, 10d et 10e), la distribution des fréquences coin est encore supérieure (dépasse $\Delta\sigma = 10$ MPa) à celle déterminée dans l'étude de [7].

Ainsi, la correction des effets de station permet une nette amélioration des résultats mais ne résout pas le problème de trade-off, lié intrinsèquement à la modélisation. À titre d'exemple, figure 7b, on observe toujours une détermination de la fréquence coin au delà d'une résolution graphique à certaines stations (ABFA, PRFA, TDBA).

4.2.2 Distribution du facteur de qualité

Figure 9, la distribution du t_* est plus resserrée après correction ; en ce qui concerne le facteur de qualité, sa distribution, similaire à celle de l'inversion n°1, a néanmoins plus de valeurs entre 300 et 450 qu'auparavant, puis au delà de 450 voit une décroissance plus rapide.

Ainsi, il semble que la correction des effets de site a pour effet d'abaisser l'estimation de l'atténuation du milieu, ce qui était déjà visible sur l'observation directe des spectres.

4.3 Inversion avec contraintes sur le facteur de qualité Q_o

Nos résultats montrent une nette amélioration de l'estimation des paramètres de source : la correction des spectres permet d'obtenir une meilleure cohérence des résultats, observable au sein d'un seul événement autant qu'en considérant l'ensemble du catalogue. Ceci fait, nous pouvons regarder plus en détail le problème du trade-off entre fréquence coin et t_* . Au premier ordre, du fait de la localisation du réseau et de la similarité des chemins traversés par les ondes, nous supposons que l'atténuation moyenne du milieu peut caractériser l'ensemble des spectres (voir répartition des épicentres et des stations figure 2). Fixer l'atténuation dans l'inversion permettrait de résoudre le problème du couplage ; dans cette partie nous tentons d'inverser l'ensemble du catalogue en fixant Q_o .

4.3.1 $Q_o = 150$

D'après la figure 9, $\simeq 50\%$ des valeurs de Q_o se situent entre 100 et 300 dans l'inversion n°2 et le maximum de la distribution est $Q_o = 150$. En supposant que le maximum de la distribution obtenue dans l'inversion n°2 ($Q_o=150$) peut être représentative du milieu, nous inversons à nouveau l'ensemble des données en fixant le facteur de qualité à $Q_o = 150$ (voir table 2). Dans un second temps, nous appliquons une correction de stations à partir des résidus obtenus dans cette inversion, et inversons à nouveau l'ensemble

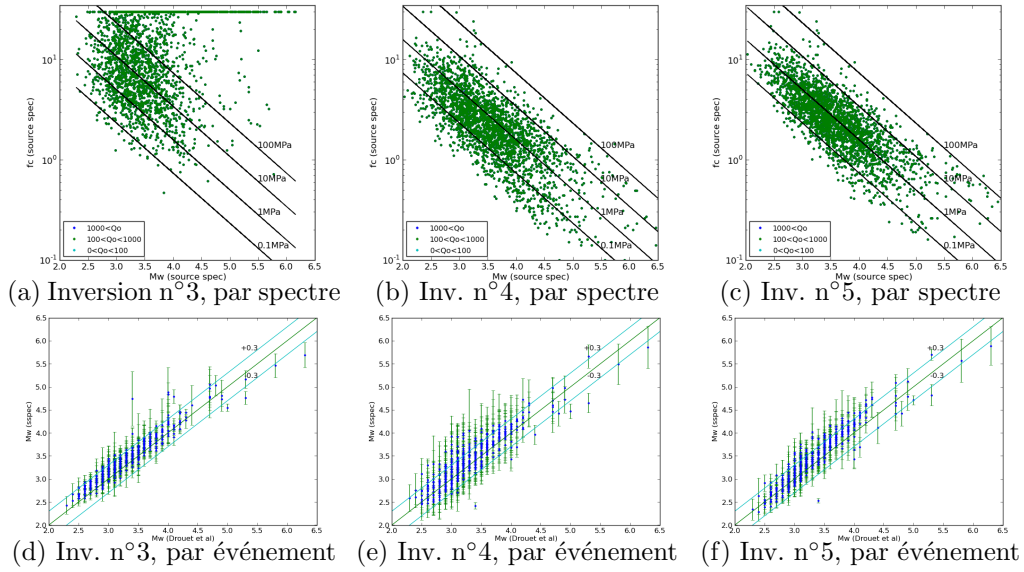


FIGURE 15: Fréquence coin en fonction de la magnitude de moment, pour chaque spectre, dans les inversions n°3, 4 et 5.

des données (inversion n°3, table 2).

Figure 15a est représentée l'ensemble des f_c en fonction des M_w ; si une partie des résultat reste comprise dans les bornes de $1 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma \leq 100 \text{ MPa}$, l'autre part montre une saturation des valeurs de f_c à la limite haute fréquence (30 Hz) des spectres.

Ainsi, ce qui apparaît comme la valeur la plus représentative de l'atténuation du milieu est incompatible avec une majeure partie des spectres, dont l'ensemble n'est par ailleurs pas associable à une caractéristique spatiale particulière (i.e. localisation des stations en Guadeloupe ou Martinique par exemple). Ainsi, il est difficile d'expliquer la valeur de $Q_o = 150$ en termes de propriétés du milieu, ainsi que la répartition des valeurs de fréquence coin dans cette inversion.

4.3.2 $Q_o = [600, 800]$

Modélisations de l'atténuation Au cours des deux premières inversions présentées ici, les distributions du facteur de qualité se concentrent sur des valeurs plus faibles ($100 \leq Q_o \leq 300$) que celle obtenue par [7] dans son inversion ($Q_o = 345$). Mais ces valeurs ne peuvent pas être comparées directement en raison des différences de modélisation entre les deux études.

Dans l'étude de [7], le terme d'atténuation, en unité de magnitude, est modélisé comme :

$$\frac{2}{3} \log_{10}(S_{attenuation}(f)) = \frac{2}{3} \log_{10} \left(\exp \left(\frac{-\pi r f}{Q_o f^\alpha V_s} \right) \frac{1}{r^\gamma} \right). \quad (10)$$

L'atténuation géométrique en $\frac{1}{r^\gamma}$ avec $\gamma = 1.077$ est plus forte que dans notre modèle

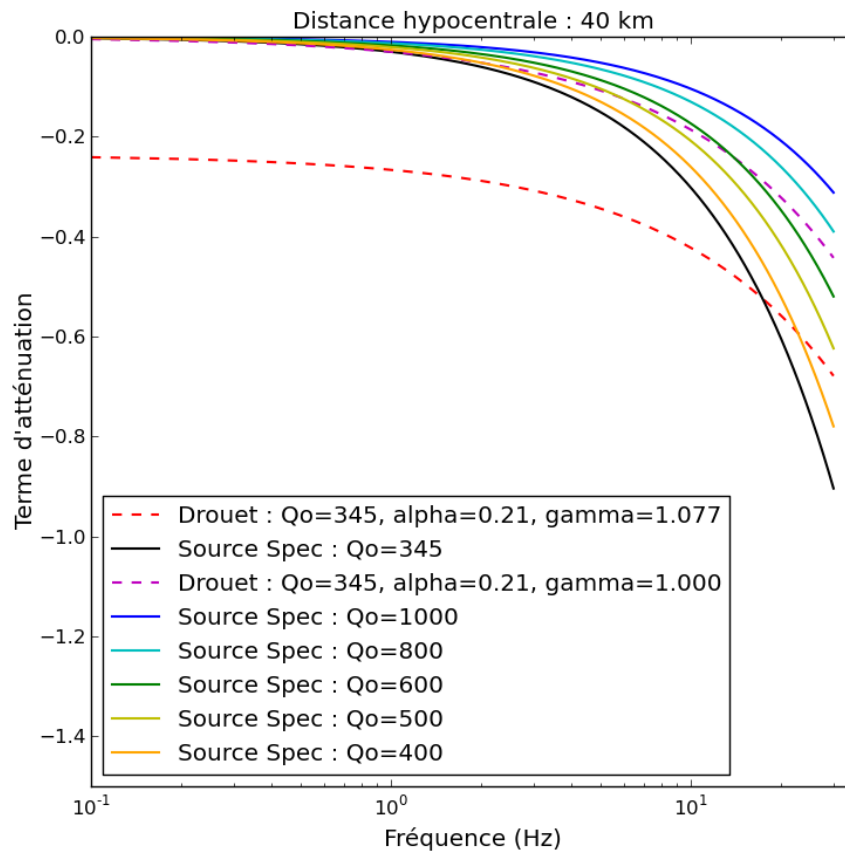


FIGURE 16: Terme d'atténuation (en unité de magnitude) calculé à la distance hypocentrale $r = 40.0$ km, dans le modèle de [7] (équation 10) avec la perte d'énergie due aux réflexions et diffractions aux interfaces ($\gamma = 1.077$) et sans en tenir compte ($\gamma = 1.0$), et dans le modèle de *source spec* (équation 2, troisième terme), pour différentes valeurs de Q_0 . On note la similitude entre les deux modèles pour ($Q_0 = 345, \gamma = 1.077$) chez [7], et ($Q_0 = 600 - 800$) dans *source spec*.

car elle tient compte de la perte d'énergie par réflexions aux interfaces et scattering (diffraction? voir les références). L'atténuation anélastique des ondes est fonction d'un facteur de qualité dépendant ici de la fréquence $Q(f) = Q_o f^\alpha$, avec $\alpha = 0.21$, et a pour effet de réduire l'effet de l'atténuation.

A distance hypocentrale fixe ($r = 40.0km$), figure 16 est représenté le terme d'atténuation en fonction de la fréquence, dans les deux modélisations considérées (équations (2) et (10)). A même facteur de qualité $Q_o = 345$, dans le modèle de [7] (ligne rouge pointillée), l'atténuation due à la perte d'énergie aux interfaces soustrait $\simeq 0.25$ unité de magnitude au spectre, quelque soit la fréquence, ce qui n'est pas le cas dans le modèle de *source spec* (ligne noire pleine). En revanche, l'atténuation des ondes aux hautes fréquences par perte d'énergie dans le milieu anélastique est bien plus importante dans le modèle de *source spec* que dans celui de [7] (courbe violette pointillée, $\gamma = 1.0$), ainsi, à 10.0 Hz le spectre perd $\simeq 0.2$ unité par rapport au plateau dans le cas de [7] contre $\simeq 0.3$ unité dans le cas de *source spec*.

La prise en compte de l'exposant γ implique que pour un même plateau observé, la magnitude de moment apparaît plus élevée de $\simeq 0.25$ unité chez [7] que dans *source spec*; dans le même sens, rappelons qu'il considère 80 % de l'énergie de la trace à partir de la première onde S. En revanche, nous combinons les 3 composantes du déplacement dans le calcul du spectre, tandis que seules les composantes horizontales sont combinées dans l'autre étude. Au final, ces trois effets semblent se compenser et nous retrouvons des valeurs similaires à celles obtenues par [7] en terme de M_w .

Si nous faisons varier les valeurs de Q_o dans le modèle de *source spec*, nous observons qu'à $Q_o \simeq 600 - 800$ (figure 16 courbes pleines verte et bleue claire), la distorsion du spectre due au terme d'atténuation se rapproche le plus de celle du modèle de [7] (courbe violette pointillée qui retire l'effet du γ). Plutôt que de comparer les valeurs de Q_o , comparer la forme de la décroissance semble plus correct.

Les distributions du facteur de qualité obtenues dans les inversions n°1 et n°2 donnent une faible part aux valeurs entre 600 et 800; mais, afin de comparer les deux études, quel est l'effet sur l'estimation des paramètres de source lorsque nous contraignons l'atténuation dans ces bornes?

Résultats Une première inversion a été réalisée (inversion n°4, table 2), puis à partir des résidus obtenus, corrigés des effets de station dans une nouvelle inversion (inversion n°5, table 2). Figures 15b et 15c sont représentées les valeurs de f_c en fonction de M_w : après correction, l'ensemble des valeurs de f_c est moins dispersé, et se situe entre 0.1 MPa et 10 MPa en termes de chute de contrainte, soit un ordre de grandeur inférieur aux valeurs obtenues dans l'inversion n°2. Elles sont également inférieures aux valeurs obtenues par [7] (figure 10e); ainsi, on arrive à obtenir une distribution cohérente de f_c , mais pas à reproduire ceux de [7]. D'autre part, remarquons que dans les inversions avec contrainte sur Q_o (figures 15d, ??, l'estimation de M_w est beaucoup plus dispersée que dans les inversions sans contrainte sur Q_o (figures 8a et 8c).

Figure 17 est représenté le champ de valeurs possibles du t_* pour différentes valeurs de Q_o , pour la gamme de distances hypocentrales utilisées ici. On voit clairement, que pour

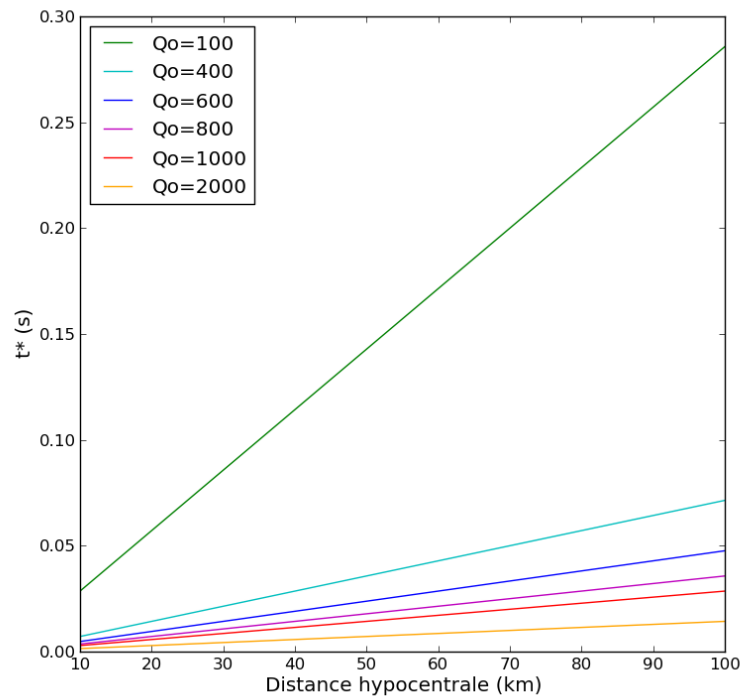


FIGURE 17: Valeurs possibles de t_* pour différentes valeurs du facteur de qualité Q_o , dans l'intervalle de distances hypocentrales du jeu de données.

$600 \leq Q_o \leq 800$, le champ de t_* est très étroit ($0.01 \leq t_* \leq 0.05$); au contraire, pour $Q_o = 150$, les valeurs de t_* varient beaucoup plus (voir, à $Q_o = 100$, le t_* peut varier entre 0.01 et .28 environ).

Plutôt qu'une propriété du milieu, les contraintes appliquées ici reflètent la localisation des valeurs du t_* .

Ainsi, la localisation des résultats de f_c reflète en partie la localisation des valeurs du t_* autant que l'atténuation en terme de propriété du milieu, et il apparaît difficile de distinguer ces deux effets.

5 Discussion et conclusion

Par une approche en deux étapes, qui nous a permis de corriger des effets de site et de tenter de contraindre les valeurs possibles du paramètre d'atténuation, nous avons pu, au premier ordre, obtenir une estimation des paramètres de source en accord avec l'observation des spectres, compatible avec les résultats d'une autre étude appliquée au même jeu de données ([7]), et cohérente sur l'ensemble des événements de la crise sis-

mique qu'elle analyse.

Si on comprend facilement l'amélioration des résultats suite à la correction des spectres résiduels, interpréter les résultats de l'inversion n°5 par rapport à ceux de l'inversion n°2 demande plus d'attention. Dans l'inversion n°5, nous avons contraint les valeurs possibles de Q_o là où les deux modèles se correspondaient le mieux ; les résultats sont en effet modifiés dans un sens qui les rapproche de ceux de [7], et moins dispersés. On peut dire que les résultats sont moins dispersés car pour $600 \leq Q_o \leq 800$, le t_* est très peu dispersé (figure 17) ; de plus, l'ensemble de valeurs de f_c sous-estime toujours celui obtenu par [7]. Néanmoins, la cohérence par rapport au modèle de Brune des valeurs de f_c sur l'ensemble des données indique qu'un facteur de qualité entre 600 et 800, modélisé tel qu'il est dans notre étude, est une valeur probable pour décrire l'atténuation du milieu au premier ordre.

La difficulté d'interpréter ces résultats réside dans la difficulté de modéliser l'atténuation du milieu, où on ne peut comparer directement les valeurs obtenues par les deux modélisations, et leur associer un sens physique. De plus, avec un modèle simple à trois paramètres (un seul pour l'atténuation), *source spec* inverse indépendamment chacun des spectres, et cela suppose le milieu hétérogène ; d'un autre côté, le modèle plus complexe (trois paramètres pour décrire les propriétés du milieu) de [7] suppose une atténuation homogène du milieu (inversion conjointe). Dans la méthode de *source spec*, en estimant indépendamment les paramètres pour chaque spectre, on souhaite dégager des propriétés communes à différents niveaux : les paramètres de source de chaque événement à partir des différentes stations l'ayant enregistré ; l'atténuation du milieu à partir des estimations obtenues pour chaque événement ; l'effet de site d'une station à partir des résidus obtenus à chaque événement ; le comportement de l'ensemble des séismes replacés dans le cadre du modèle de Brune. Parvenir à représenter les données et à mettre en évidence des caractéristiques communes par un modèle simple appliqué indépendamment est la force de cette méthode.

Ce but est obtenu pour la magnitude de moment, comme le montrent la cohérence des résultats et l'observation directe des spectres. De même, nous avons pu mettre en évidence des effets de site à la plupart des stations. Par contre, le problème du couplage entre fréquence coin et atténuation persiste. Regarder plus finement la relation entre les valeurs de f_c et celles de Q_o est peut être une piste pour mettre en évidence le couplage à l'échelle du catalogue. Par ailleurs, le manque de connaissance sur la structure aux Petites Antilles joue un rôle important, notamment pour estimer l'hétérogénéité de la structure en termes de vitesses d'ondes P et S. De même, la localisation des événements serait nettement améliorée. Enfin, dans l'optique d'étendre cette étude à la sismicité des Petites Antilles, on a besoin d'une meilleure connaissance des variations de V_p et V_s , ainsi qu'une couverture instrumentale assurant une bonne localisation.

6 Appendice

...À faire.

Références

- [1] Boore and Boatwright. Average body-wave radiation coefficients. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984.
- [2] Brune. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 1970.
- [3] Dorel. Sismicité et structure de l'arc des petites antilles et du bassin atlantique. *Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie*, 1978.
- [4] Bazin et al. The 2004–2005 les saintes (french west indies) seismic aftershock sequence observed with ocean bottom seismometers. *Tectonophysics*, 2010.
- [5] Bengoubou-Valérius et al. Cdsa : a new seismological data center for the french lesser antilles. *Seismological Research Letters*, 2008.
- [6] Courboux et al. Groundmotion simulations of the 2004 mw 6.4 les saintes, guadeloupe, earthquake using ten smaller events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010.
- [7] Drouet et al. New moment magnitude scale, evidence of stress drop magnitude scaling and stochastic ground motion model for the french west indies. *Geophysical Journal International*, 2011.
- [8] Feuillet et al. The mw = 6.3, november 21, 2004, les saintes earthquake (guadeloupe) : Tectonic setting, slip model and static stress changes. *Journal of Geophysical Research*, 2011.
- [9] Matrullo et al. Scaling relationship for source parameters of the seismicity of the corinth rift (greece). *EGU General Assembly 2013*, 2013.
- [10] Jousset and Douglas. Long-period earthquake ground displacements recorded on guadeloupe (french antilles). *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007.

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'équipe de Sismologie de l'IPGP. Je voudrais remercier Marie-Paule Bouin et Claudio Satriano pour m'avoir encadré et répondu à mes nombreuses questions tout au long du stage.