

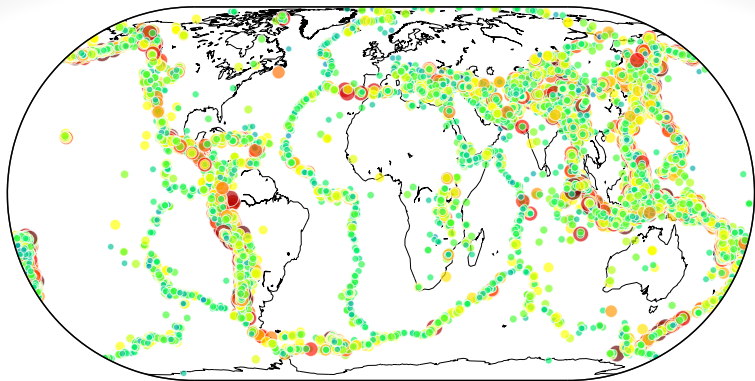
Détermination non-linéaire des paramètres hypocentaux et structuraux : application à la sismicité intracontinentale du Massif armoricain

Méric HAUGMARD

jury : *Rapporteurs* : B. DELOUIS & J. DÉVERCHÈRE
Examineurs : J. VAN DEN DRIESSCHE, S. LAMBOTTE & T. BODIN
Encadrants : A. MOCQUET & É. BEUCLER

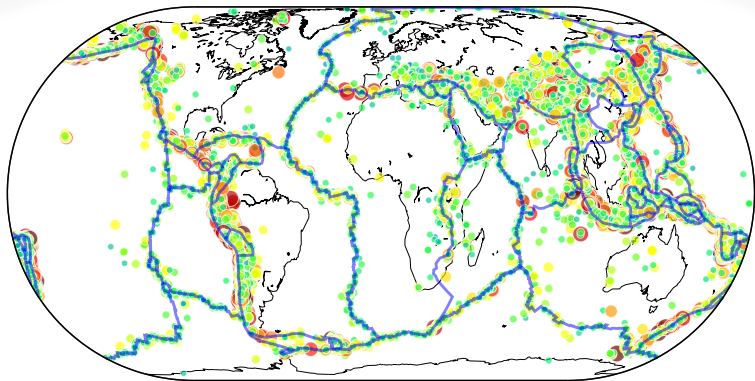
- le 14 octobre 2016 -





· $M_W : 5$ · $M_W : 6$ · $M_W : 7$ · $M_W : 8$ · $M_W : 9$

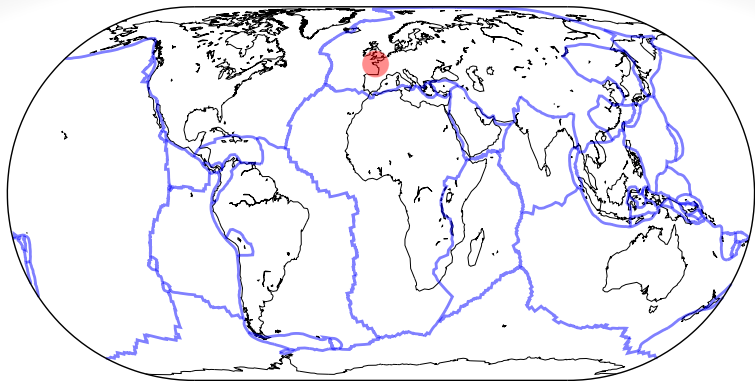
Sismicité globale (de 1904 à 2009) 24 000 séismes (Storchak & coll., 2013)



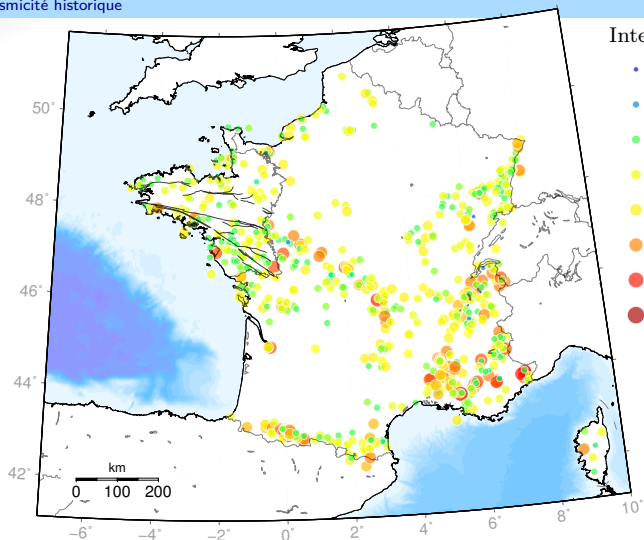
· $M_W : 5$ · $M_W : 6$ · $M_W : 7$ · $M_W : 8$ · $M_W : 9$

Sismicité globale (de 1904 à 2009) 24 000 séismes (Storchak & coll., 2013)

→ limites plaques (Bird, 2003)



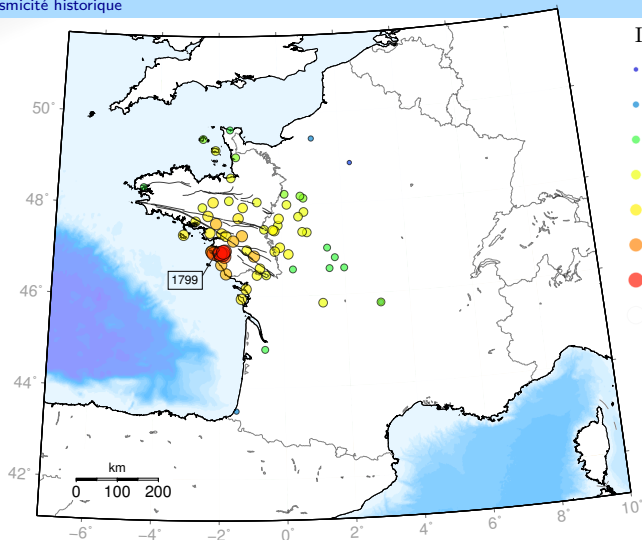
Sismicité globale (de 1904 à 2009) 24 000 séismes (Storchak & coll., 2013)



Intensités épicentrales (MSK) :

- II secousse peu ressentie
- III secousse faible
- IV secousse modérée
- V secousse forte
- VI dommages légers
- VII dommages prononcés
- VIII dégâts massifs
- IX destructions nombreuses

Sismicité historique (de 1142 à 1962), 822 séismes

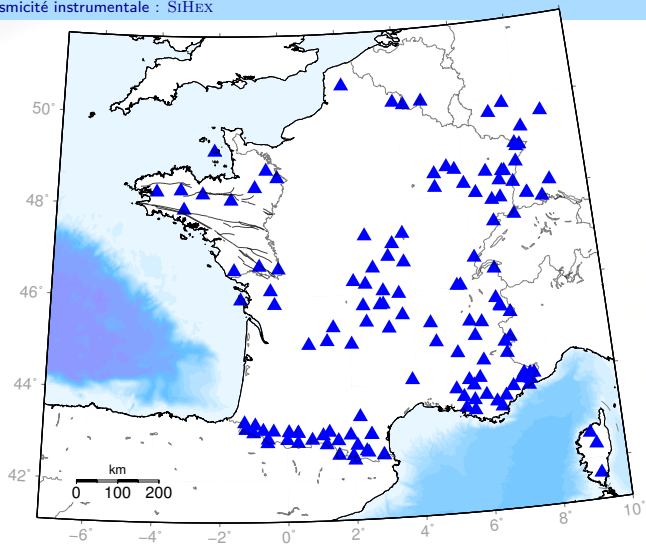


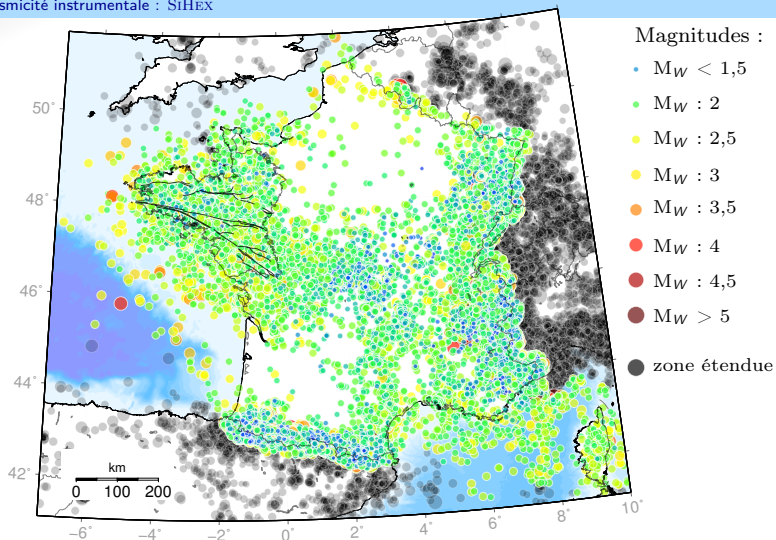
Intensités (MSK) :

- II secousse peu ressentie
- III secousse faible
- IV secousse modérée
- V secousse forte
- VI dommages légers
- VII dommages prononcés
- VIII dégâts massifs



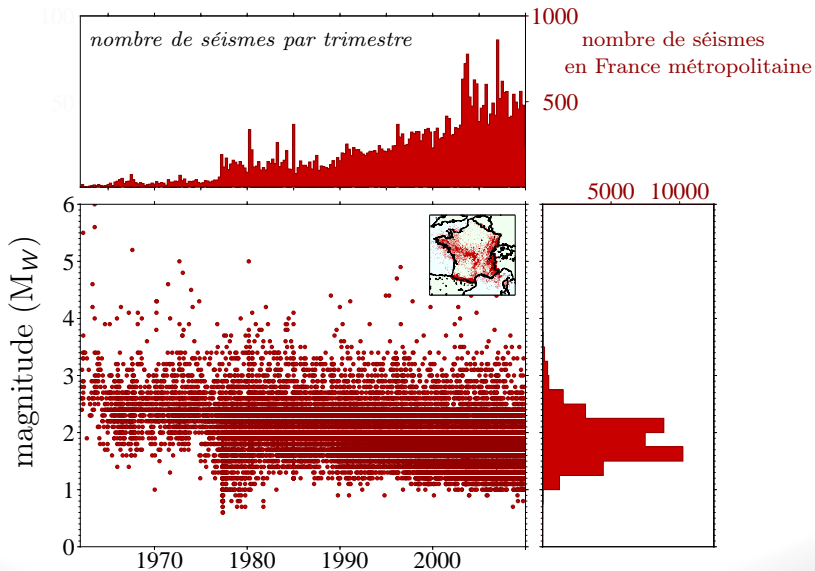
Exemple du séisme du Marais Breton (1799)

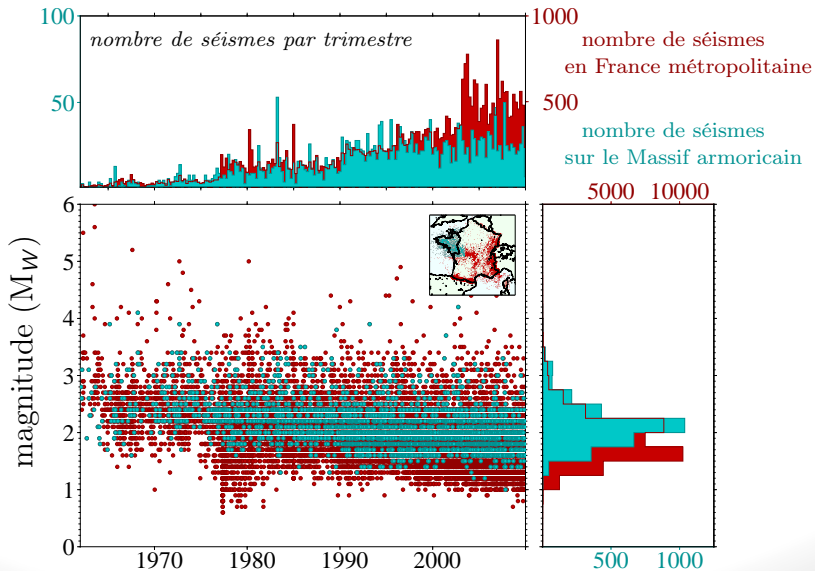





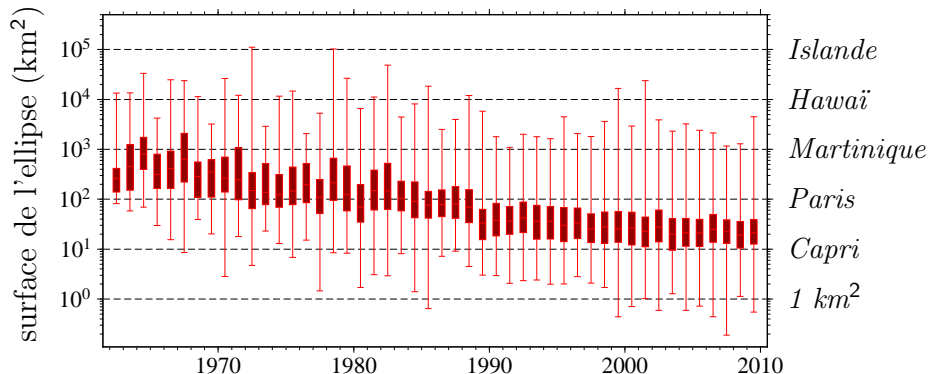
Sismicité instrumentale (de 1962 à 2009) : SIHEX (Cara & coll., 2015)

dont : Judenherc (2000), Mazabraud (2004), Perrot & coll. (2005), Arroucau (2006) 3 / 45






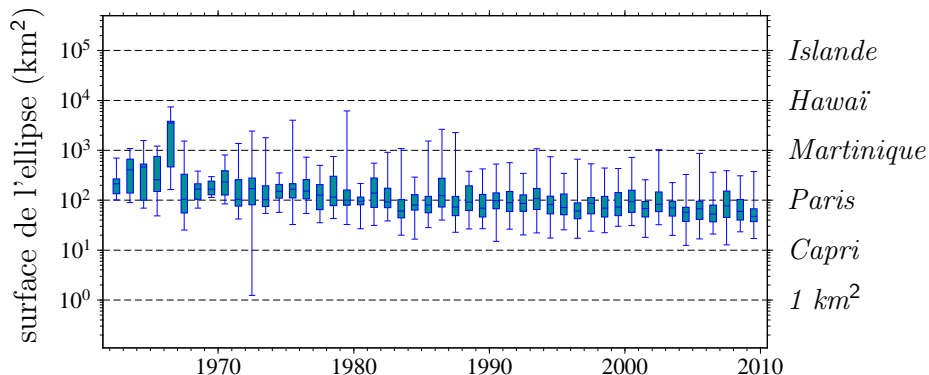
 : médiane, quartiles, valeurs extrêmes



Incertitude épacentrale en **France métropolitaine**

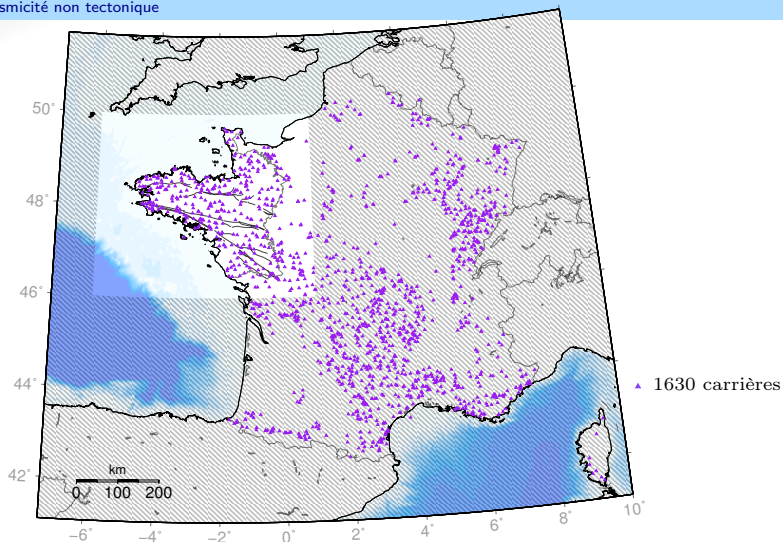
SiHEX (Cara & coll., 2015)

 : médiane, quartiles, valeurs extrêmes



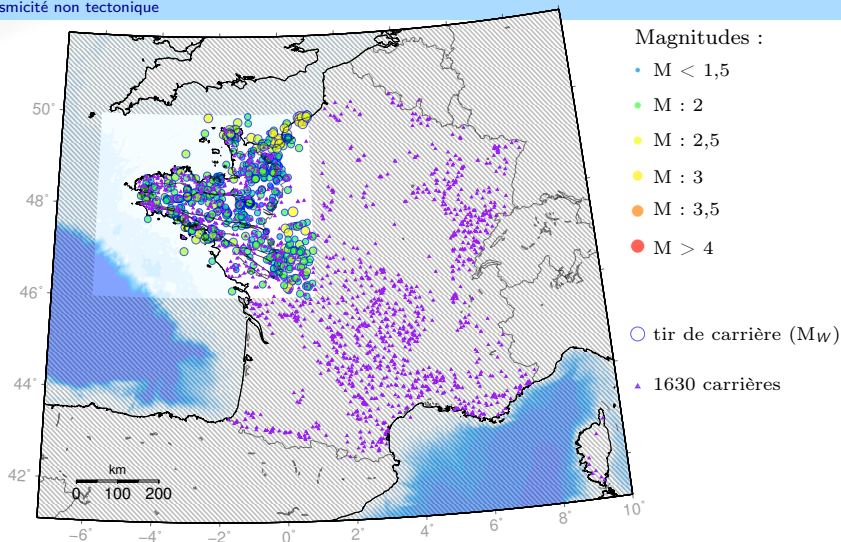
Incertitude épacentrale sur le [Massif armoricain](#)

SiHEX (Cara & coll., 2015)



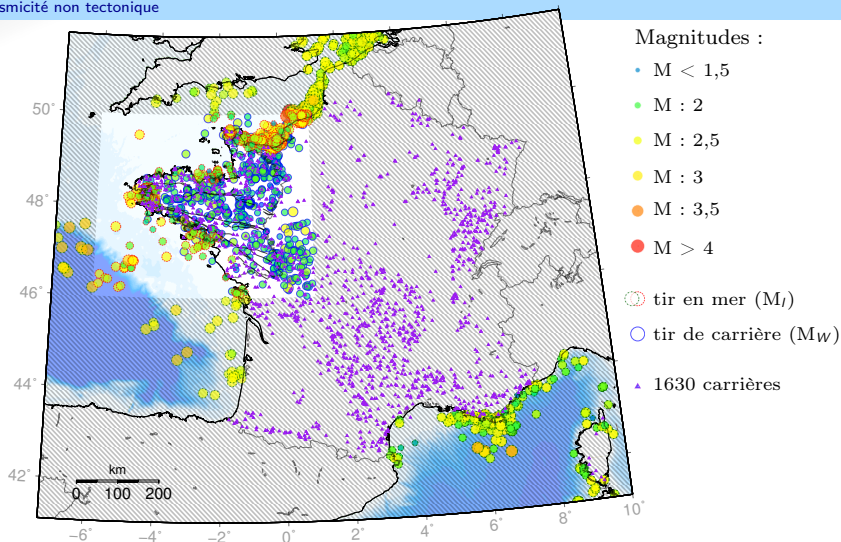
Événements non tectoniques : carrières

entre 1962 et 2009 SiHEX (Cara & coll., 2015)



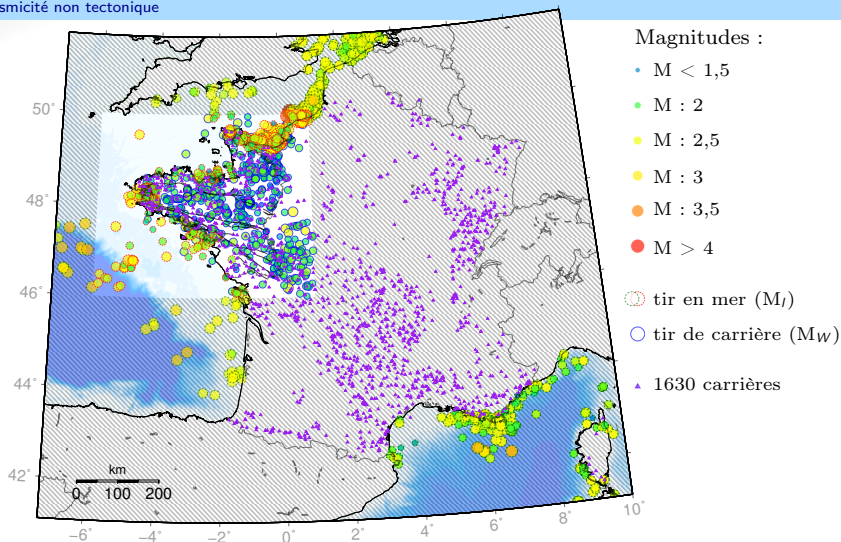
Événements non tectoniques : sur terre (871)

entre 1962 et 2009 SiHEX (Cara & coll., 2015)



Événements non tectoniques : sur terre (871) en mer (681)

entre 1962 et 2009 SiHEX (Cara & coll., 2015)



Événements non tectoniques : $\frac{1}{3}$ sur le Massif armoricain

entre 1962 et 2009 SiHEX (Cara & coll., 2015)

amélioration de la localisation

événements de magnitude $M_W \leq 5$
contexte intracontinental

localisation adaptée :

- au réseau (peu dense + inhomogène)
- au contexte géologique (structure)
- à la sismicité (apparemment diffuse)

nouvelles données :

- réseau PYROPE, PYROPE+, 2011-2013
- campagne post-séisme, nov.-déc. 2013

Sommaire :

1. Méthodes de localisation hypocentrale
 2. Développement méthodologique
 3. Traitement des données
 4. Vannes : une expérience post-séisme
 5. PYROPE : sismicité entre 2011 et 2013
- Conclusion & perspectives

ondes P et S → covariance
entre profondeur (z_h) et temps origine (t_0)

données

temps d'arrivées : ondes directes (P_g, S_g) et réfractées (P_n, S_n)

données

temps d'arrivées : ondes directes (P_g, S_g) et réfractées (P_n, S_n)

paramètres hypocentaux

- longitude (ϕ)
- latitude (λ)
- profondeur (h_z)
- temps origine (t_0)

+

paramètres structuraux

- 1D, 3D
- vitesse des ondes $P(\alpha)$
- vitesse des ondes $S(\beta)$
- profondeur du Moho (z_n)

données

temps d'arrivées : ondes directes (P_g, S_g) et réfractées (P_n, S_n)

↑ problème direct ↑

paramètres hypocentaux

- longitude (ϕ)
- latitude (λ)
- profondeur (h_z)
- temps origine (t_0)

+

paramètres structuraux

- 1D, 3D
- vitesse des ondes $P(\alpha)$
- vitesse des ondes $S(\beta)$
- profondeur du Moho (z_n)

problème direct

$$\mathcal{T}_{P_g} = t_0 + \frac{\sqrt{\Delta_e^2 + (z_h + z_\Lambda)^2}}{\alpha_1}; \quad \mathcal{T}_{P_n} = t_0 + \frac{\Delta_e}{\alpha_n} + \frac{(2z_n - h_z + z_\Lambda) \cos i_c}{\alpha_1}; \quad \text{etc.}$$

données

temps d'arrivées : ondes directes (P_g, S_g) et réfractées (P_n, S_n)

↓ *problème inverse* ↓

paramètres hypocentaux

- longitude (ϕ)
- latitude (λ)
- profondeur (h_z)
- temps origine (t_0)

+

paramètres structuraux

- 1D, 3D
- vitesse des ondes $P(\alpha)$
- vitesse des ondes $S(\beta)$
- profondeur du Moho (z_n)

problème direct

$$\mathcal{T}_{P_g} = t_0 + \frac{\sqrt{\Delta_e^2 + (z_h + z_\lambda)^2}}{\alpha_1}; \quad \mathcal{T}_{P_n} = t_0 + \frac{\Delta_e}{\alpha_n} + \frac{(2z_n - h_z + z_\lambda) \cos i_c}{\alpha_1}; \quad \text{etc.}$$

données

temps d'arrivées : ondes directes (P_g, S_g) et réfractées (P_n, S_n)

↓ *problème inverse* ↓

paramètres hypocentaux

- longitude (ϕ)
- latitude (λ)
- profondeur (h_z)
- temps origine (t_0)

+

paramètres structuraux

- 1D, 3D
- vitesse des ondes $P(\alpha)$
- vitesse des ondes $S(\beta)$
- profondeur du Moho (z_n)

problème sous déterminé

Méthode déterministe (Geiger, 1910, 1912) :
 → optimisation itérative par moindres carrés

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{théo} - T_{réels})^2}{n}}$$

méthode Newton-Raphson

avantages

rapide, robuste

inconvénients

déterministe

dépendance modèle initial

p. ex., Eaton (1970) ; Lee & Lahr (1975) ; Herrmann (1979) ; Lienert & coll. (1986) ; Schweitzer (1997) ; Klein (2002) ; Fréchet & coll. (2011)

Méthode déterministe (Geiger, 1910, 1912) :

→ optimisation itérative par moindres carrés

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{théo} - T_{réels})^2}{n}}$$

méthode Newton-Raphson

avantages

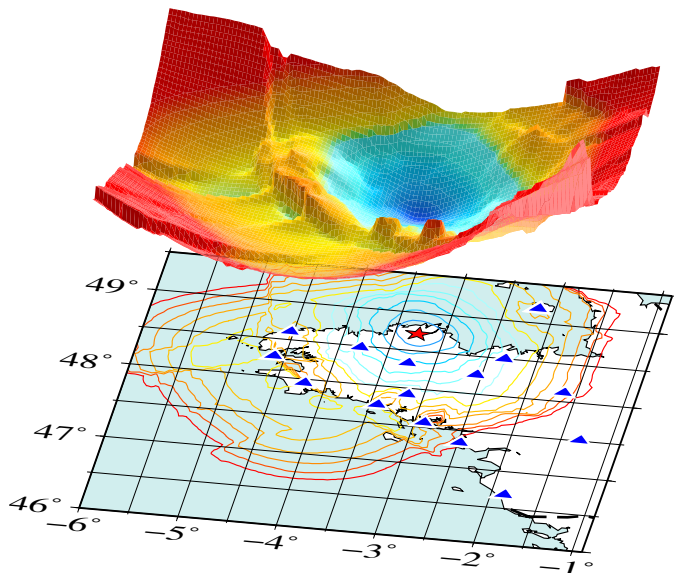
rapide, robuste

inconvénients

déterministe

dépendance modèle initial

p. ex., Eaton (1970) ; Lee & Lahr (1975) ; Herrmann (1979) ; Lienert & coll. (1986) ; Schweitzer (1997) ; Klein (2002) ; Fréchet & coll. (2011)



Séisme du 25 avril 2012, 21h02:24, près de Guingamp

optimisation itérative par moindres carrés (Geiger, 1910, 1912)

algorithme du simplexe (Dantzig & coll., 1955)

Joint Hypocenter Determination (Douglas, 1967)

HYPODD (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

↳ dépendance aux paramètres initiaux

optimisation itérative par moindres carrés (Geiger, 1910, 1912)

algorithme du simplexe (Dantzig & coll., 1955)

Joint Hypocenter Determination (Douglas, 1967)

HYPODD (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

↳ dépendance aux paramètres initiaux

↳ nécessite un modèle de Terre

optimisation itérative par moindres carrés (Geiger, 1910, 1912)

algorithme du simplexe (Dantzig & coll., 1955)

Joint Hypocenter Determination (Douglas, 1967)

HYPODD (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

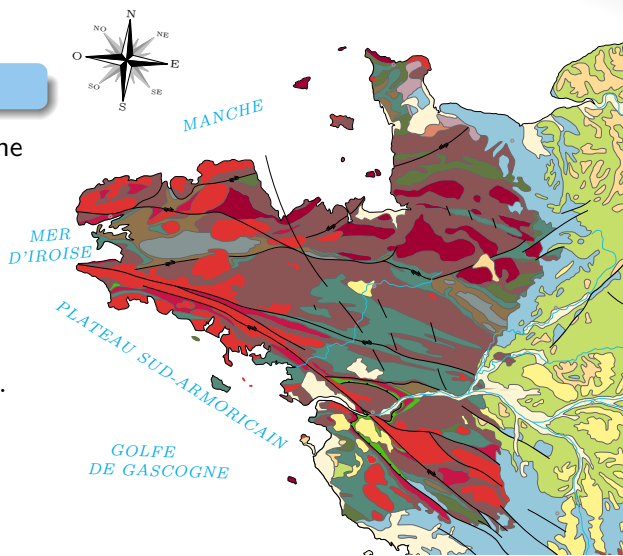
↳ dépendance aux paramètres initiaux

↳ nécessite un modèle de Terre

*La structure du Massif armoricain
est-elle bien contrainte ?*

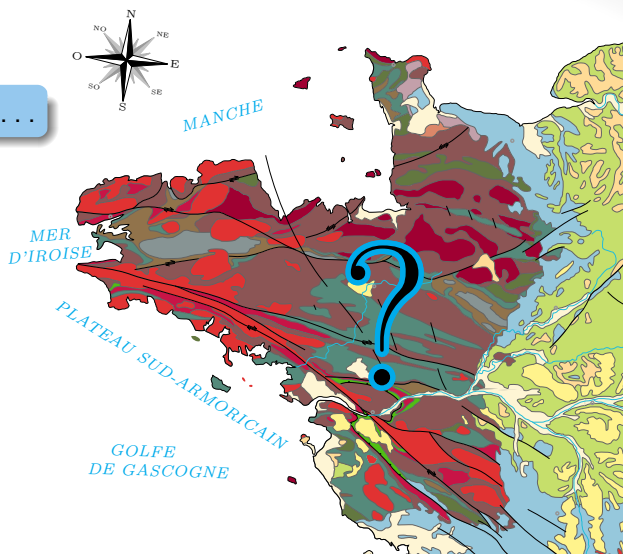
Formation

- l'orogénèse panafricaine
localement cadomienne
~ 650 et 540 Ma
- l'orogénèse varisque
localement hercynienne
~ 420 et 290 Ma
- peu modifié depuis ...

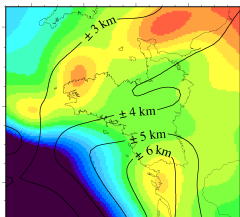


De larges incertitudes ...

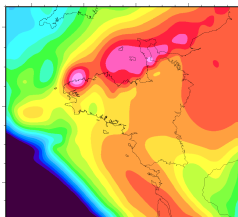
- vitesses sismiques ;
- profondeur Moho ;
- contact avec bassins sédimentaires.



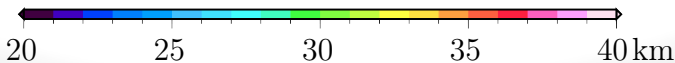
Variabilité des modèles de profondeur de la discontinuité de Mohorovičić



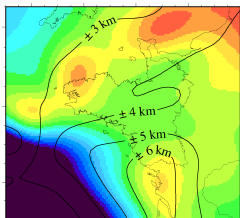
Grad & coll. (2009)



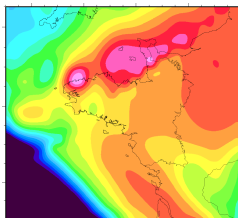
Tesauro & coll. (2008)



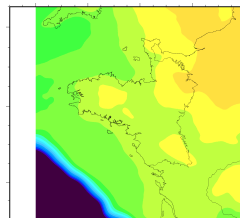
Variabilité des modèles de profondeur de la discontinuité de Mohorovičić



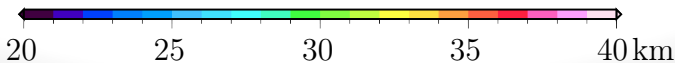
Grad & coll. (2009)



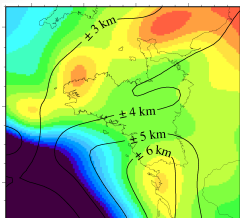
Tesauro & coll. (2008)



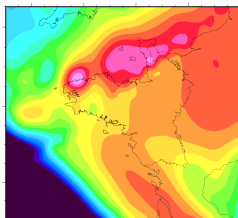
Arroucau & Fullea, *com. pers.*



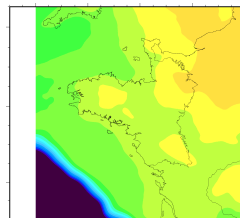
Variabilité des modèles de profondeur de la discontinuité de Mohorovičić



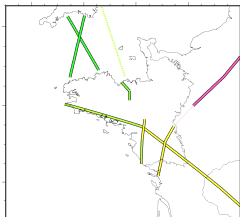
Grad & coll. (2009)



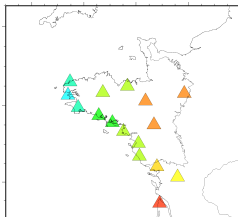
Tesauro & coll. (2008)



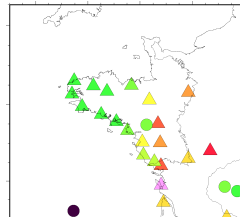
Arroucau & Fullea, *com. pers.*



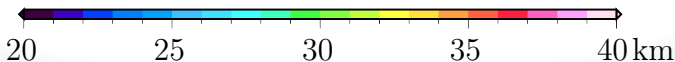
ÉCORS, SWAT, Armor



Vergne & Beucler, *com. pers.*

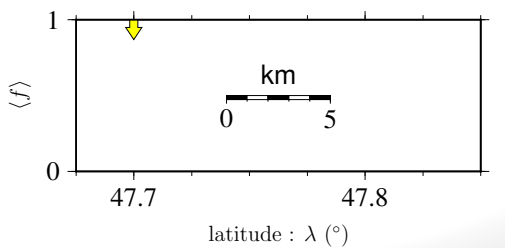
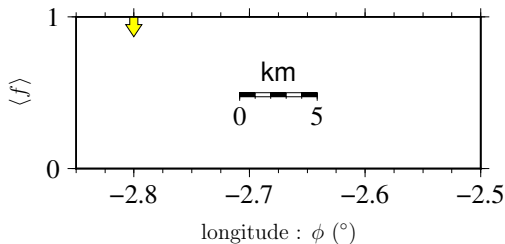
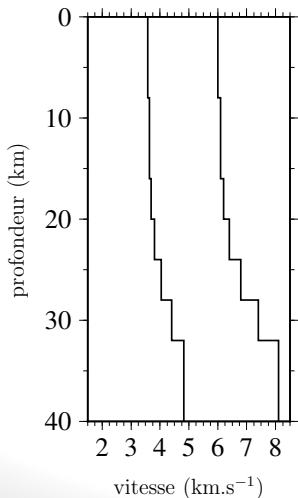


Chevrot & coll. (2014)



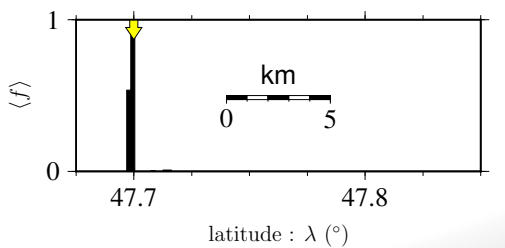
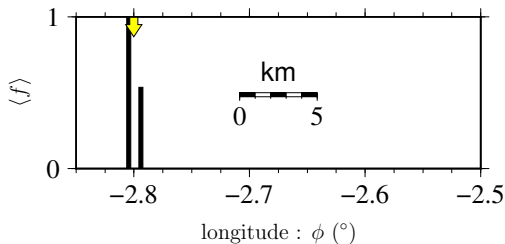
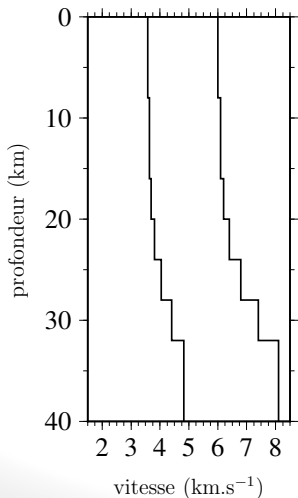
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)

Méthode déterministe Geiger (1912)



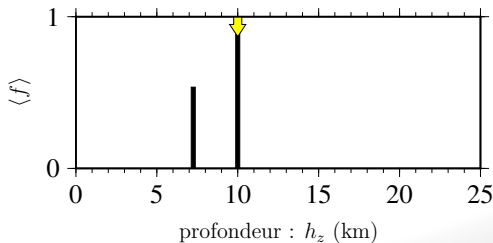
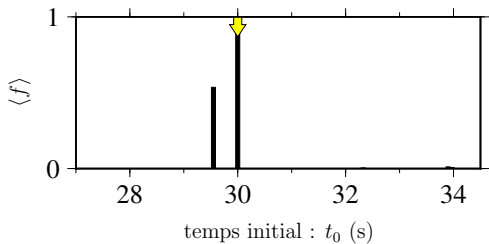
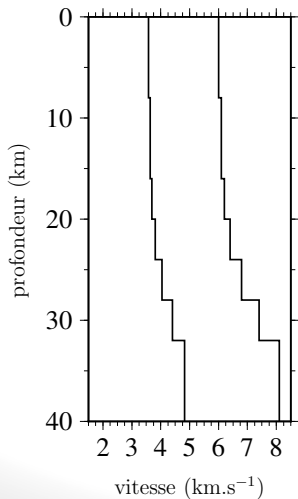
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)

Méthode déterministe Geiger (1912)



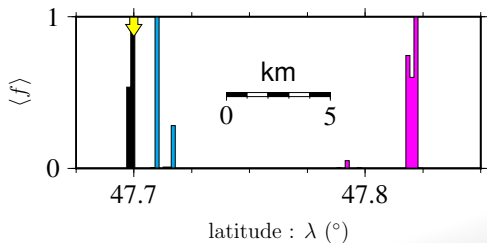
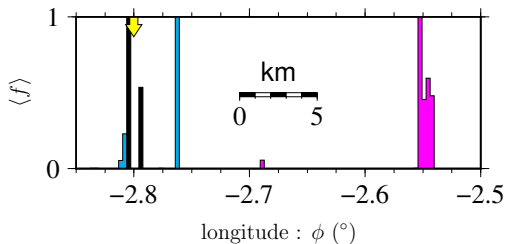
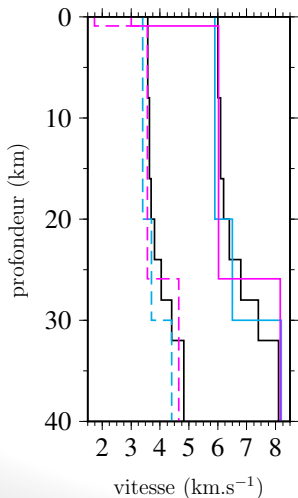
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)

Méthode déterministe Geiger (1912)



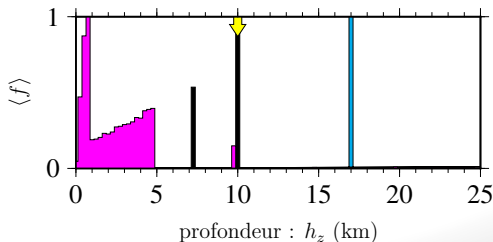
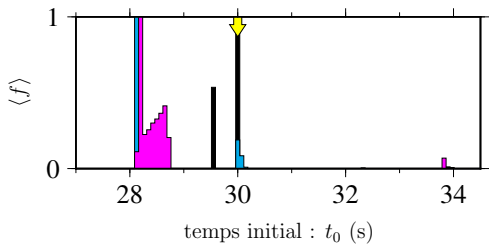
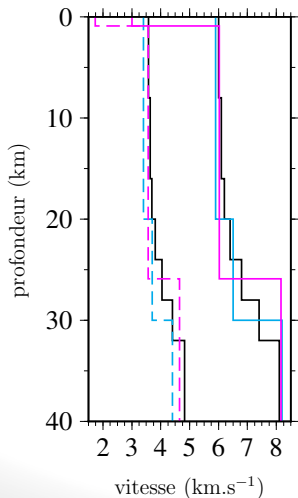
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)

Méthode déterministe Geiger (1912)



données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)

Méthode déterministe Geiger (1912)



optimisation itérative par moindres carrés (Geiger, 1910, 1912)

algorithme du simplexe (Dantzig & coll., 1955)

Joint Hypocenter Determination (Douglas, 1967)

HYPODD (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

↳ dépendance aux paramètres initiaux

NonLinLoc (Lomax & coll., 2000) modèle de terre fixé

↳ dépendance au modèle de terre *a priori*

méthodes probabilistes de type Monte-Carlo

Kim & coll. (2006) ; Arroucau (2006) ; Myers & coll. (2007) BAYHLOC

Introduction

1. Méthodes de localisation hypocentrale
- 2. Développement méthodologique**
3. Traitement des données
4. Vannes : une expérience post-séisme
5. PYROPE : sismicité entre 2011 et 2013

Conclusion & perspectives

Détermination probabiliste des paramètres hypocentaux et structuraux pour N séismes

indépendant d'un modèle *a priori*

- 4 N paramètres hypocentaux : λ , ϕ , t_0 , h_z ;
- 4 paramètres structuraux : α_1 , α_n , $\frac{\alpha}{\beta}$, z_n .

modèle de terre 1-D apparent décrit par les données

publication (*en cours de soumission*)



Le théorème *de la probabilité des causes* :

$$\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}}) = \frac{\mathbb{L}(\mathbf{d}^{\text{obs}}|\mathbf{p}) \times \mathbb{P}(\mathbf{p})}{\mathbb{P}(\mathbf{d}^{\text{obs}})}$$

Bayes & Price (1763)

Le théorème *de la probabilité des causes* :

$$\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}}) \propto \mathbb{L}(\mathbf{d}^{\text{obs}}|\mathbf{p})$$

Bayes & Price (1763)

Le théorème *de la probabilité des causes* :

$$\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}}) \propto \mathbb{L}(\mathbf{d}^{\text{obs}}|\mathbf{p})$$

Bayes & Price (1763)

→ algorithme de Metropolis

L'algorithme de Metropolis (Metropolis & Ulam, 1949)

permet d'échantillonner la distribution *a posteriori* $\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}})$
au travers de **chaîne(s) de Markov** (Markov, 1913)

À la k^{e} itération,

1) génération aléatoire d'un modèle

2) sélection ou rejet du modèle

L'algorithme de Metropolis (Metropolis & Ulam, 1949)

permet d'échantillonner la distribution *a posteriori* $\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}})$
 au travers de **chaîne(s) de Markov** (Markov, 1913)

À la k^{e} itération,

1) génération aléatoire d'un modèle :

selon une loi $\mathcal{N}(\mathbf{p}_{k-1}, \sigma) \rightarrow$ « perte de mémoire »

2) sélection ou rejet du modèle

L'algorithme de Metropolis (Metropolis & Ulam, 1949) permet d'échantillonner la distribution *a posteriori* $\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}})$ au travers de **chaîne(s) de Markov** (Markov, 1913)

À la k^{e} itération,

1) génération aléatoire d'un modèle :

selon une loi $\mathcal{N}(\mathbf{p}_{k-1}, \sigma) \rightarrow$ « perte de mémoire »

2) sélection ou rejet du modèle :

$$\pi(k|k-1) = \frac{\mathbb{P}(p_k = y|\mathbf{d}^{\text{obs}})}{\mathbb{P}(p_{k-1} = y'|\mathbf{d}^{\text{obs}})} = \frac{\mathbb{L}(\mathbf{d}^{\text{obs}}|p_k = y)}{\mathbb{L}(\mathbf{d}^{\text{obs}}|p_{k-1} = y')}$$

L'algorithme de Metropolis (Metropolis & Ulam, 1949) permet d'échantillonner la distribution *a posteriori* $\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}})$ au travers de **chaîne(s) de Markov** (Markov, 1913)

À la k^{e} itération,

1) génération aléatoire d'un modèle :

selon une loi $\mathcal{N}(\mathbf{p}_{k-1}, \sigma) \rightarrow$ « perte de mémoire »

2) sélection ou rejet du modèle :

$$\pi(k|k-1) = \frac{\mathbb{P}(p_k = y|\mathbf{d}^{\text{obs}})}{\mathbb{P}(p_{k-1} = y'|\mathbf{d}^{\text{obs}})} = \exp\left(\frac{\mathcal{S}_{k-1} - \mathcal{S}_k}{2}\right)$$

$$\text{avec } \mathcal{S}(\mathbf{p}_k, \mathbf{d}^{\text{obs}}) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j \left(\frac{d_j^{\text{obs}} - d_j^{\text{cal}}}{\sigma_j}\right)^2 \quad \text{pour } j \text{ données}$$

L'algorithme de Metropolis (Metropolis & Ulam, 1949)
 permet d'échantillonner la distribution *a posteriori* $\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}})$
 au travers de **chaîne(s) de Markov** (Markov, 1913)

À la k^{e} itération,

1) génération aléatoire d'un modèle :

selon une loi $\mathcal{N}(\mathbf{p}_{k-1}, \sigma) \rightarrow$ « perte de mémoire »

2) sélection ou rejet du modèle :

$$\pi(k|k-1) = \frac{\mathbb{P}(p_k = y|\mathbf{d}^{\text{obs}})}{\mathbb{P}(p_{k-1} = y'|\mathbf{d}^{\text{obs}})} = \exp\left(\frac{\mathcal{S}_{k-1} - \mathcal{S}_k}{2}\right)$$

si fonction coût $\searrow \rightarrow$ modèle \checkmark

L'algorithme de Metropolis (Metropolis & Ulam, 1949) permet d'échantillonner la distribution *a posteriori* $\mathbb{P}(\mathbf{p}|\mathbf{d}^{\text{obs}})$ au travers de **chaîne(s) de Markov** (Markov, 1913)

À la k^{e} itération,

1) génération aléatoire d'un modèle :

selon une loi $\mathcal{N}(\mathbf{p}_{k-1}, \sigma) \rightarrow$ « perte de mémoire »

2) sélection ou rejet du modèle :

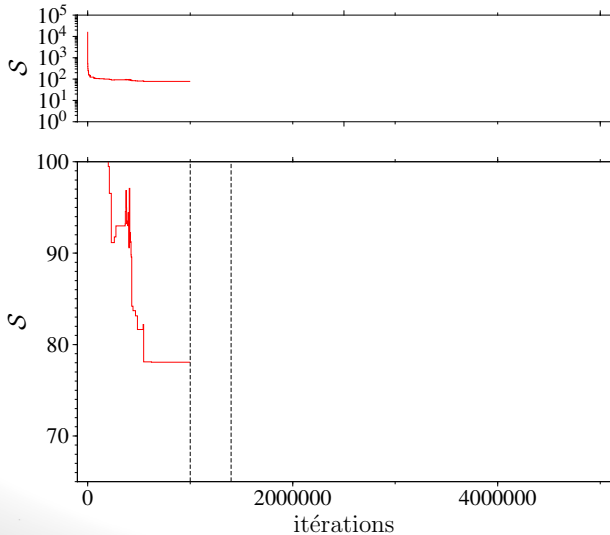
$$\pi(k|k-1) = \frac{\mathbb{P}(p_k = y|\mathbf{d}^{\text{obs}})}{\mathbb{P}(p_{k-1} = y'|\mathbf{d}^{\text{obs}})} = \exp\left(\frac{\mathcal{S}_{k-1} - \mathcal{S}_k}{2}\right)$$

σ : rapidité de convergence

\rightarrow taux d'acceptance $\sim 20\%$ (Gelman & coll., 2013)

3 chaînes de Markov en parallèles → convergence statistique

chaque chaîne de Markov : 2 étapes (Coldruns et Hotruns)

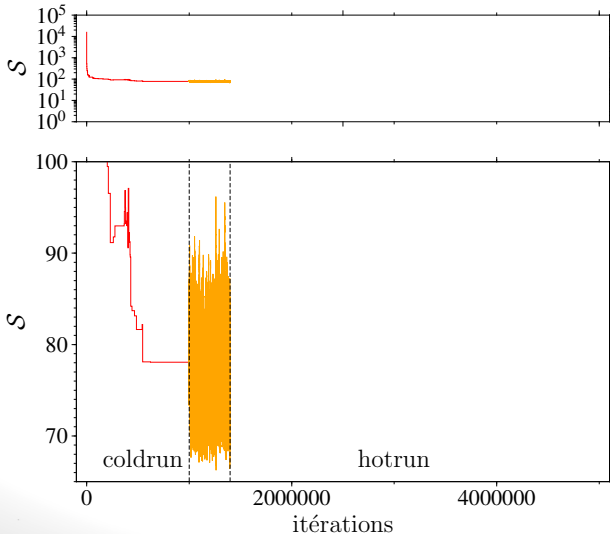


coldruns

échantillonnage
de tous les
paramètres

sauvegarde du
meilleur modèle

chaque chaîne de Markov : 2 étapes (Coldruns et Hotruns)



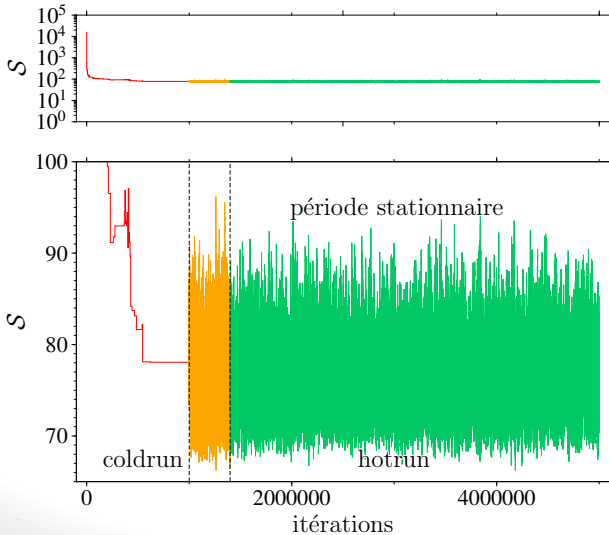
hotruns

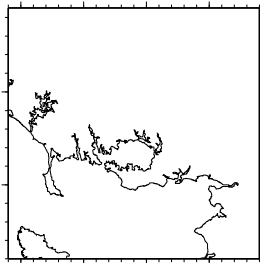
échantillonnage
d'un petit
nombre de
paramètres

↘ σ

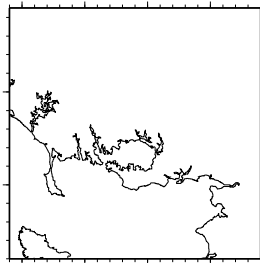
implémentation en 2 étapes : coldruns et hotruns

chaque chaîne de Markov : 2 étapes (Coldruns et Hotruns)

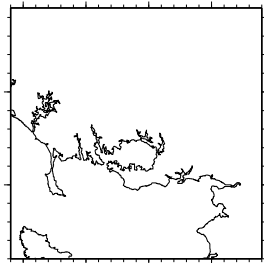




1 station

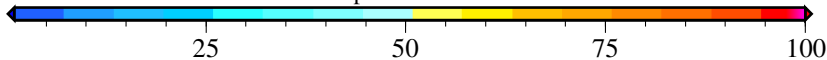


2 stations

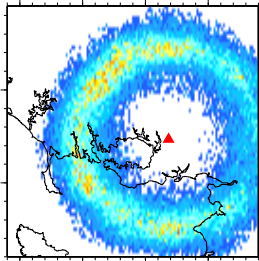


3 stations

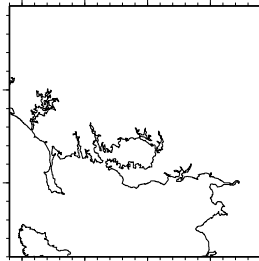
densité de probabilité normalisée



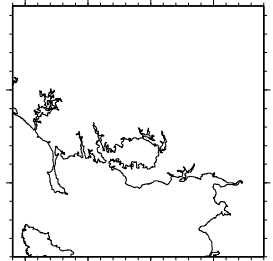
Premier exemple avec des données réelles



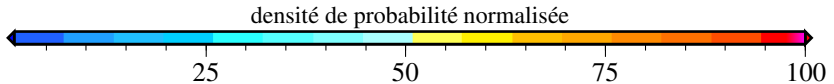
1 station

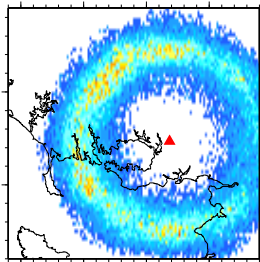


2 stations

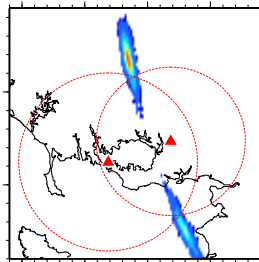


3 stations

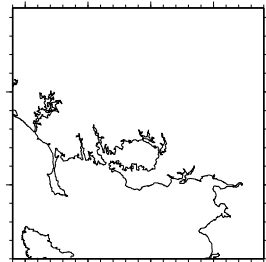




1 station

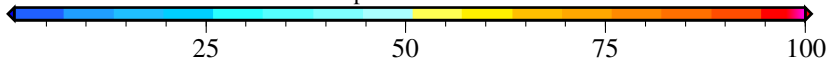


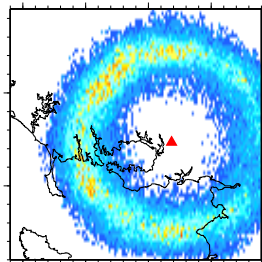
2 stations



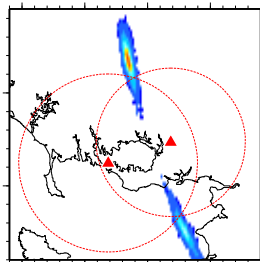
3 stations

densité de probabilité normalisée

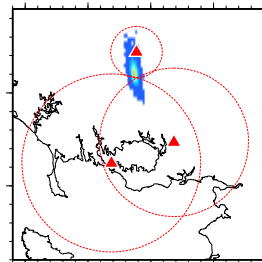




1 station

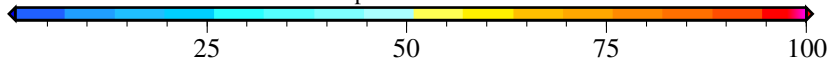


2 stations



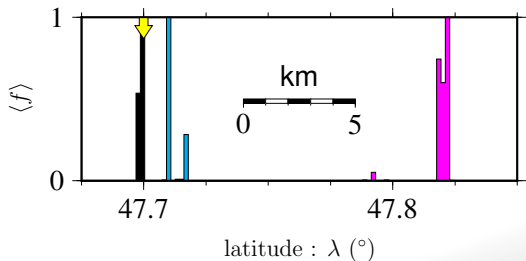
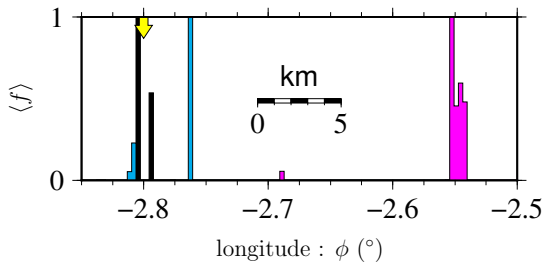
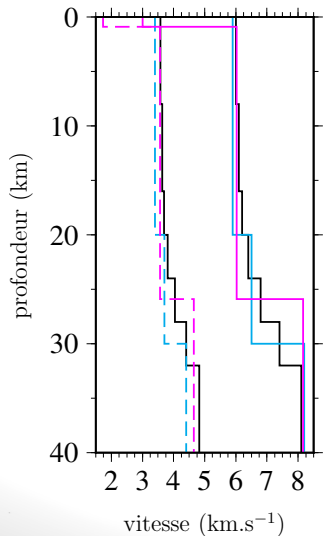
3 stations

densité de probabilité normalisée

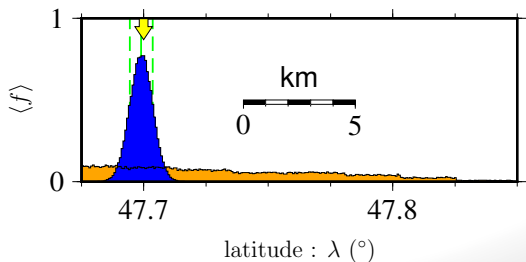
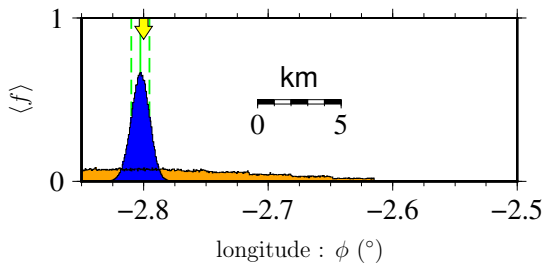
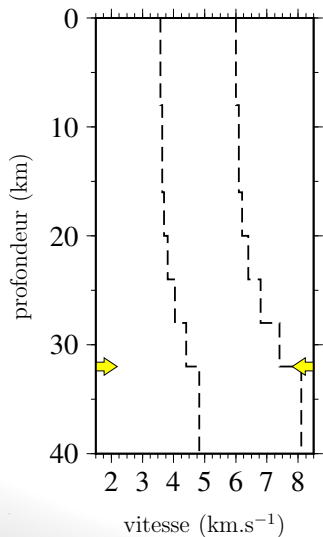


Second exemple synthétique

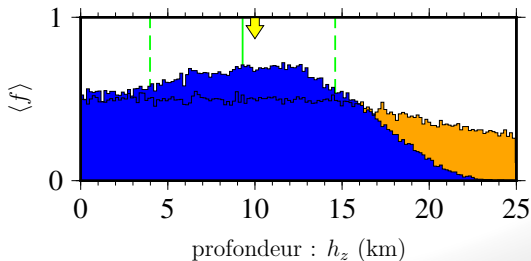
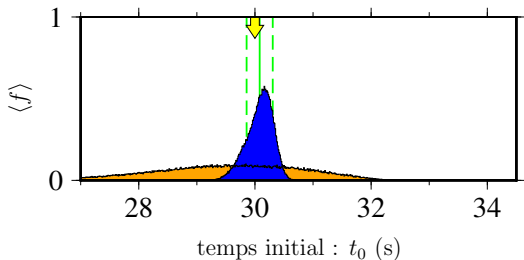
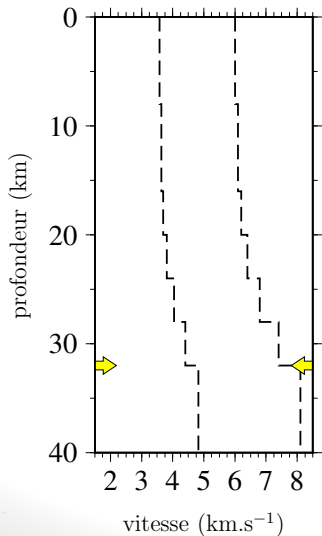
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)



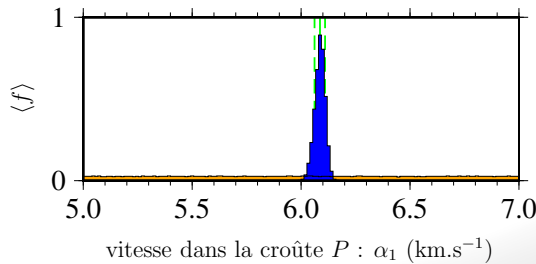
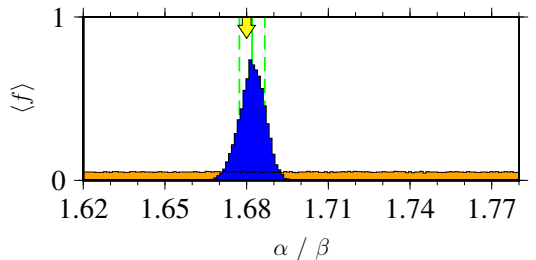
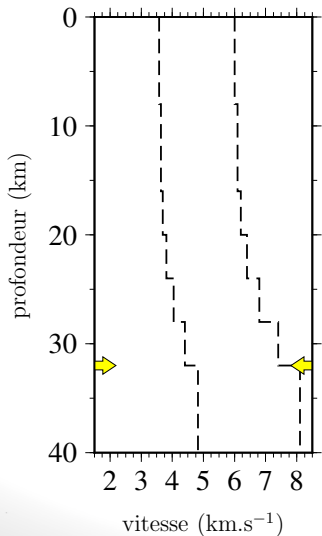
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)



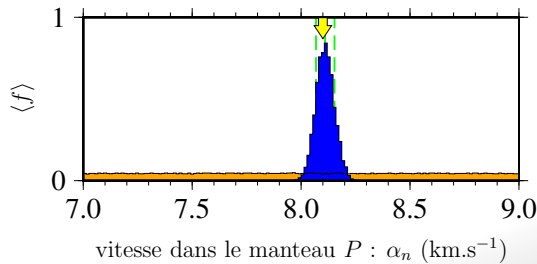
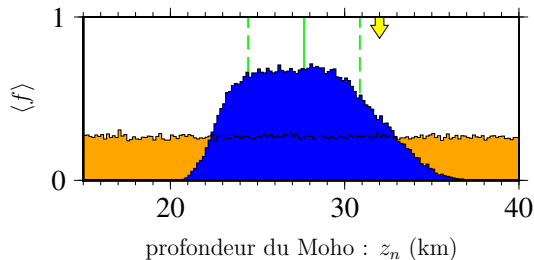
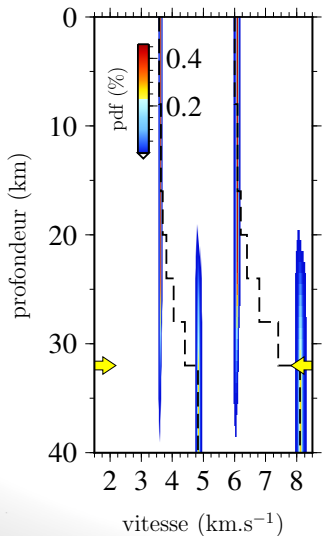
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)



données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)



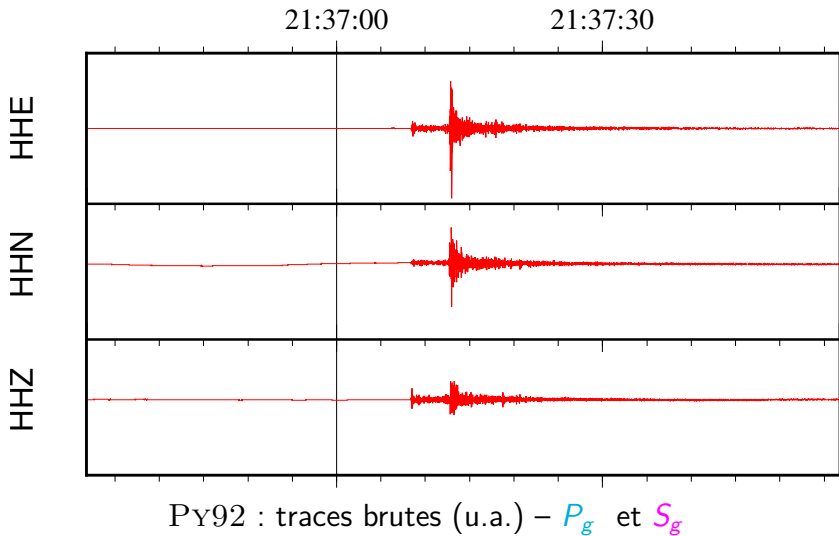
données synthétiques : 30 ondes directes + 22 ondes réfractées ($\pm \delta t$)

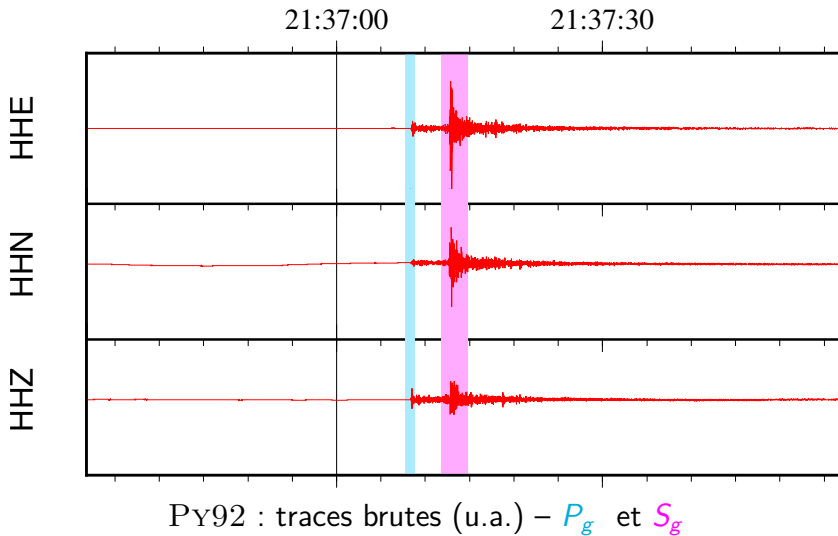


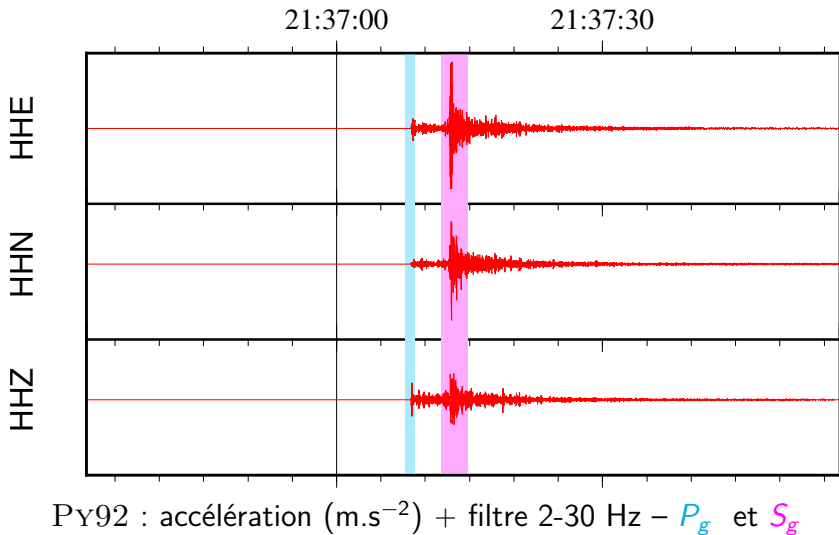
Introduction

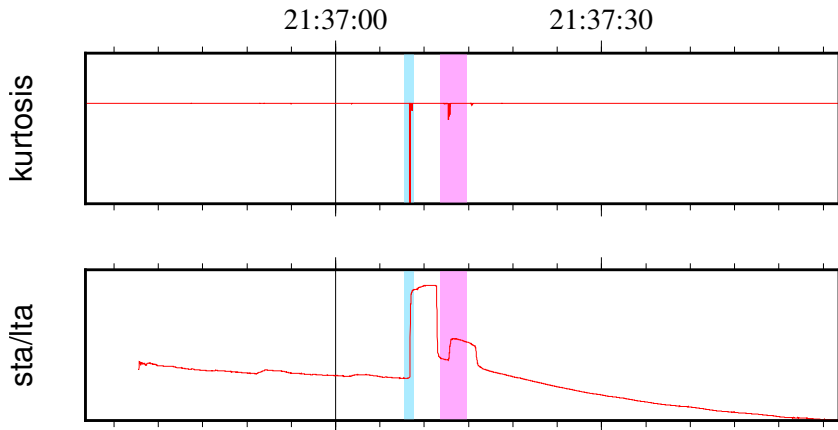
1. Méthodes de localisation hypocentrale
2. Développement méthodologique
- 3. Traitement des données**
4. Vannes : une expérience post-séisme
5. PYROPE : sismicité entre 2011 et 2013

Conclusion & perspectives

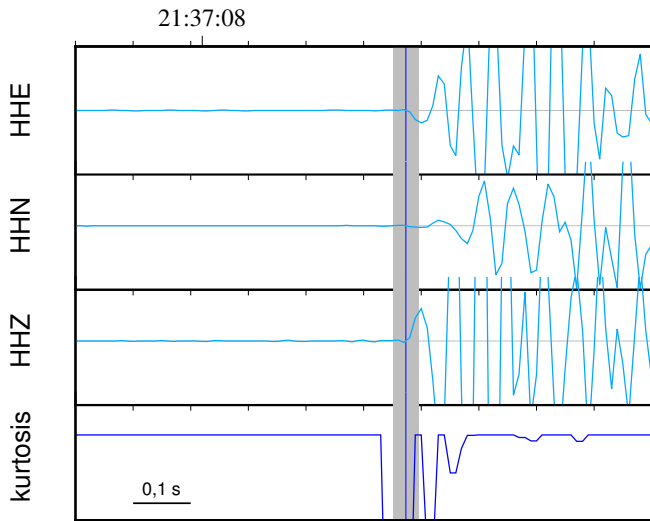




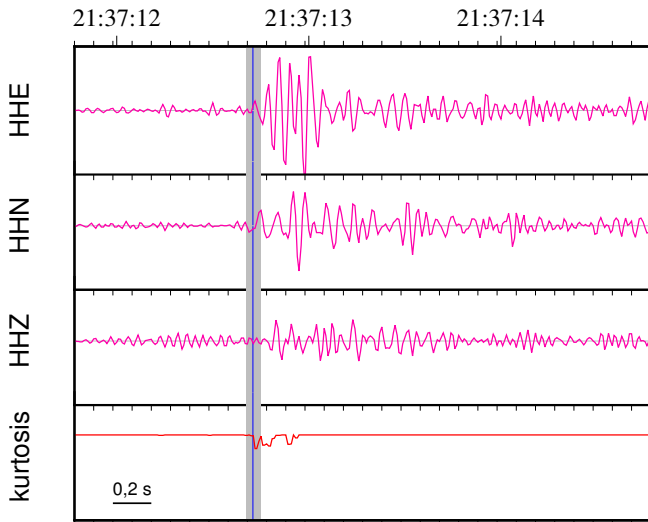




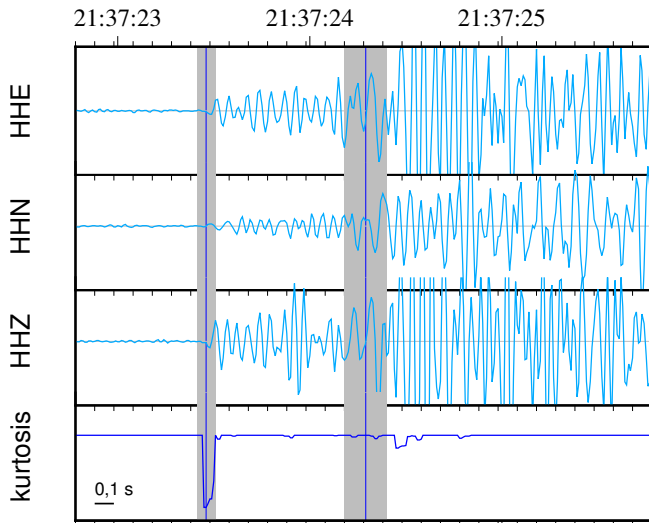
PY92 : sta/lta (Allen, 1978) : sta=0,5 s, lta=30 s, sta/lta > 15 ;
 kurtosis (Baillard & coll., 2014).



PY92 ($\Delta = 35$ km), accélérogramme : onde P_g



PY92 ($\Delta = 35$ km), accélérogramme : onde S_g

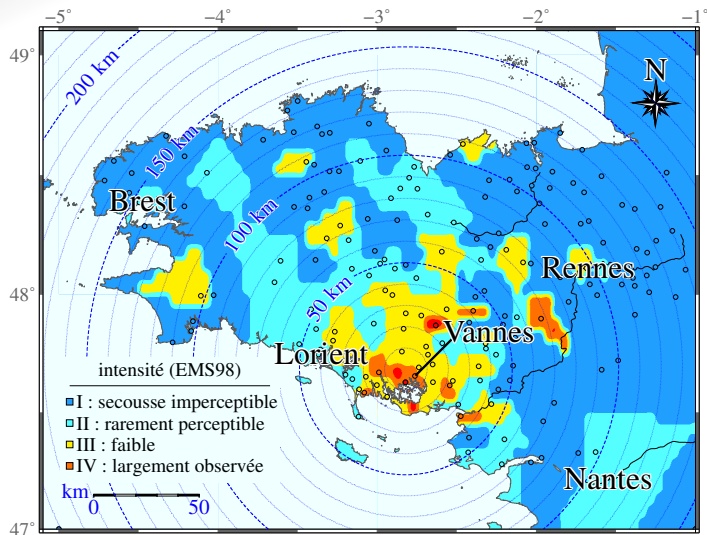


PY95 ($\Delta = 135$ km), accélérogramme : onde P_g et P_n

Introduction

1. Méthodes de localisation hypocentrale
2. Développement méthodologique
3. Traitement des données
4. **Vannes : une expérience post-séisme**
5. PYROPE : sismicité entre 2011 et 2013

Conclusion & perspectives



Lorient 2002

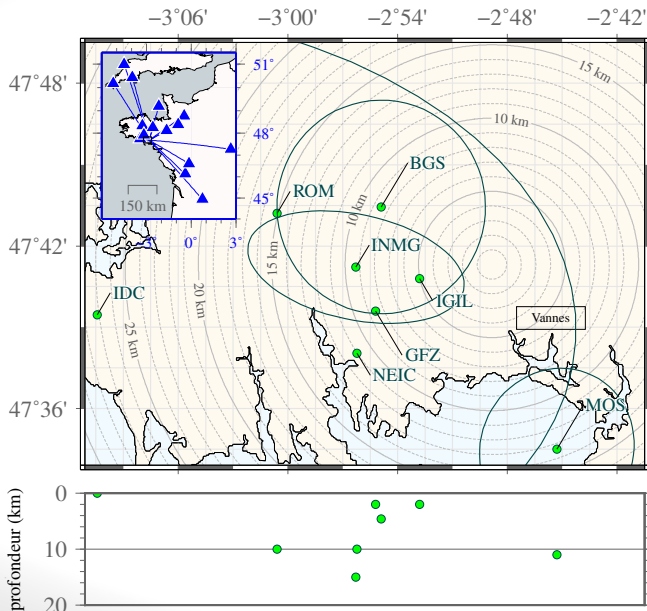
$M_W = 4,3$

Perrot & coll.

(2005)

Séisme du 21 novembre 2013 à 10h53 ; $M_L = 4,6$ (3,9)

Enquête macrosismique du BCSF



organismes :

BGS : britannique ;

GFZ : allemand ;

MOS : russe ;

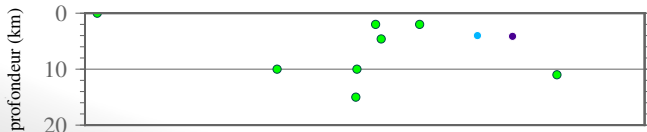
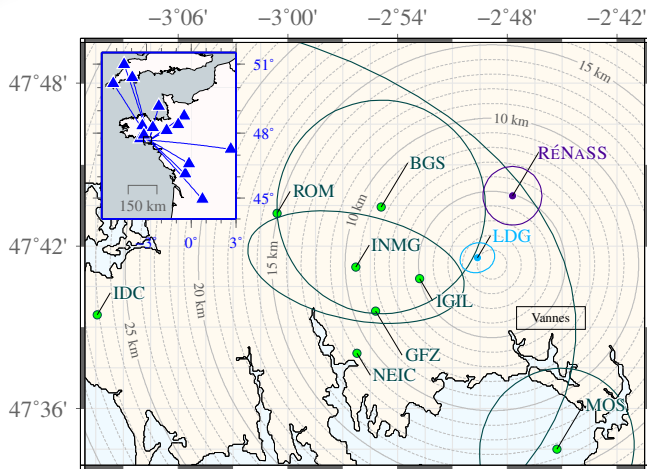
IGIL : portugais ;

INMG : portugais ;

IDC : autrichien ;

ROM : italien ;

NEIC : états-unien .



organismes :

BGS : britannique ;

GFZ : allemand ;

MOS : russe ;

IGIL : portugais ;

INMG : portugais ;

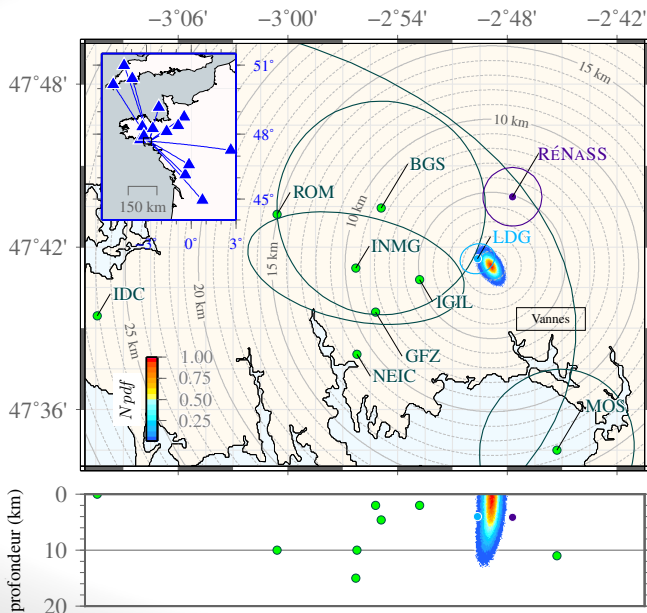
IDC : autrichien ;

ROM : italien ;

NEIC : états-unien ;

LDG : français ;

RÉNASS : français.



organismes :

BGS : britannique ;

GFZ : allemand ;

MOS : russe ;

IGIL : portugais ;

INMG : portugais ;

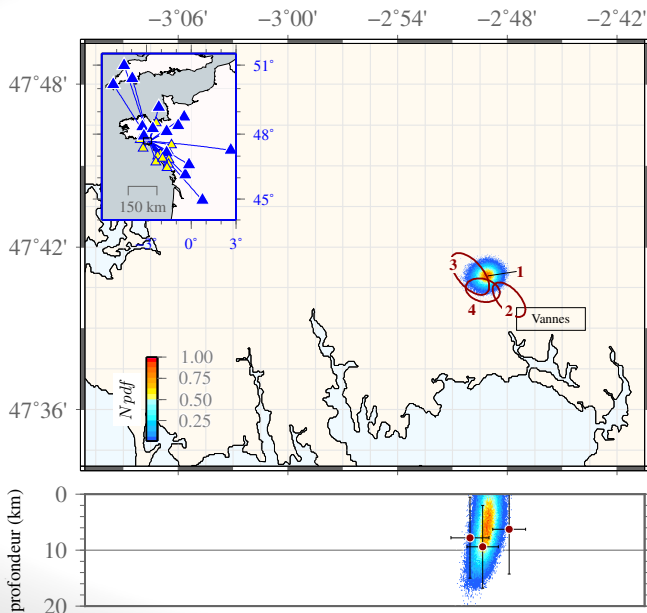
IDC : autrichien ;

ROM : italien ;

NEIC : états-unien ;

LDG : français ;

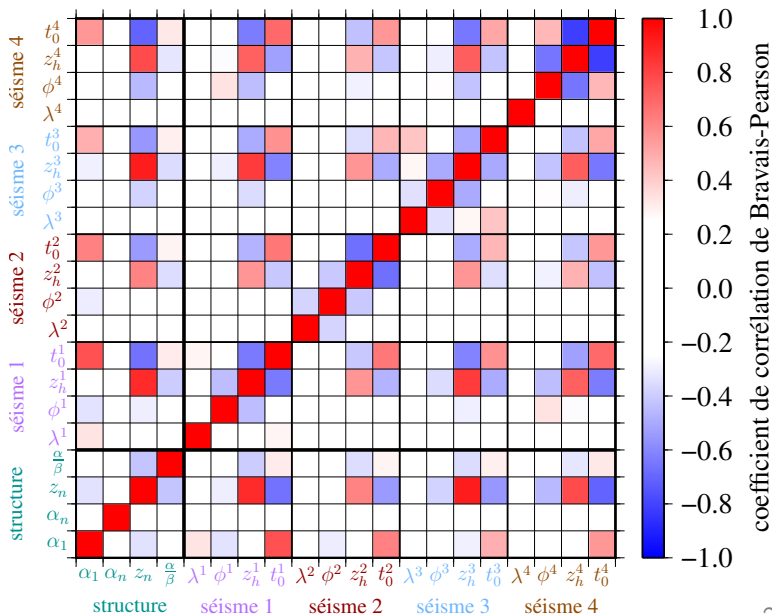
RÉNASS : français ;

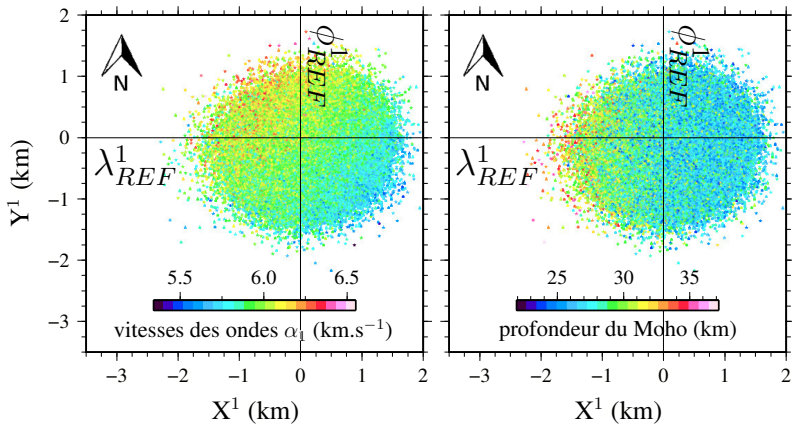


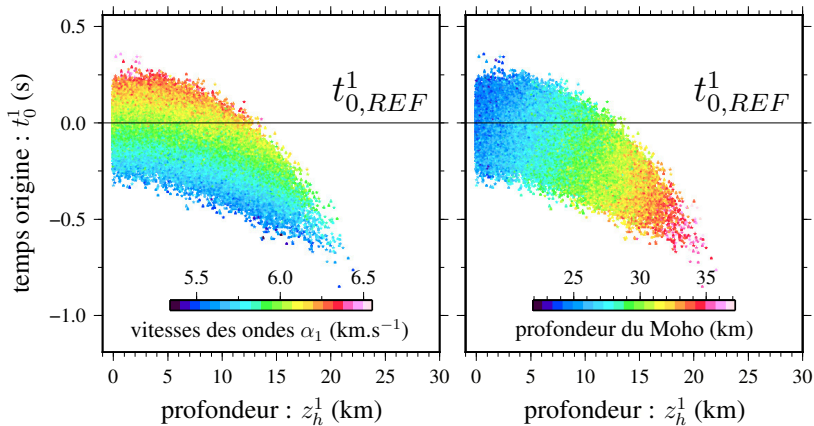
4 séismes

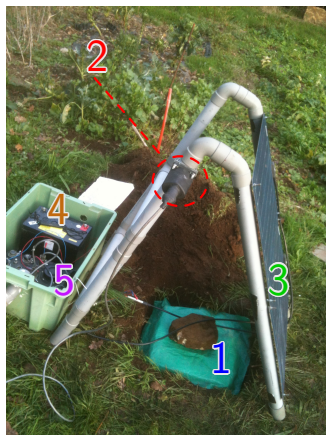
+

données
temporaires



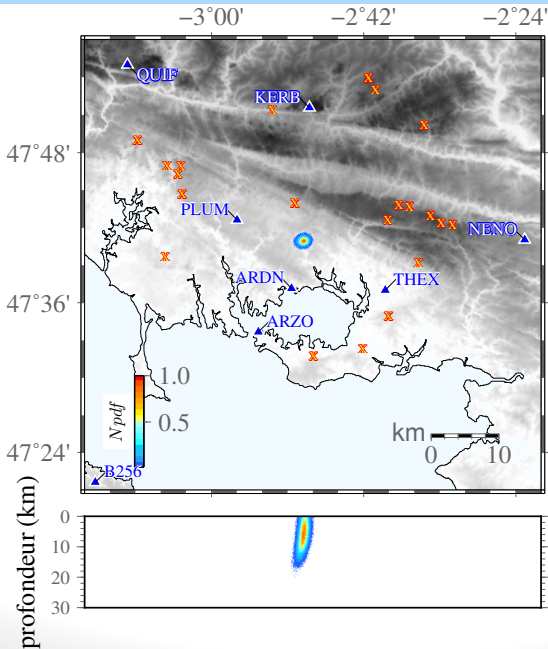






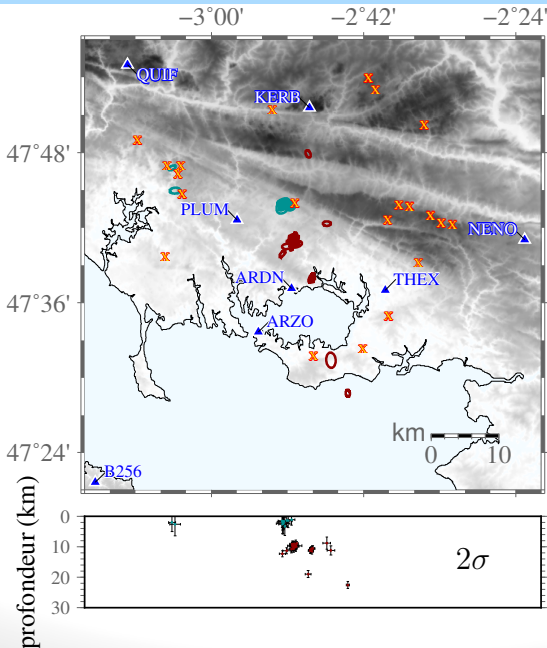
Station NENO : **1** - capteur ; **2** - antenne G.P.S. ; **3** - panneaux solaires ; **4** - batterie ; **5** - le système d'acquisition.

Campagne post-séisme : 1 mois



331 P_g
 256 S_g

Campagne post-séisme : 1 mois



48 événements :
 23+9+4 séismes
 12 tirs

331 P_g
 256 S_g

$\alpha_1 = 6,2 \pm 0,1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

$\frac{\alpha}{\beta} = 1,69$

Lorient 2002,

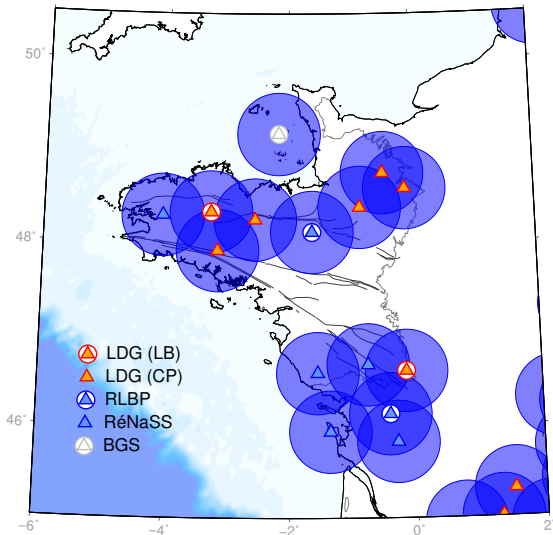
Perrot & coll. (2005)

Introduction

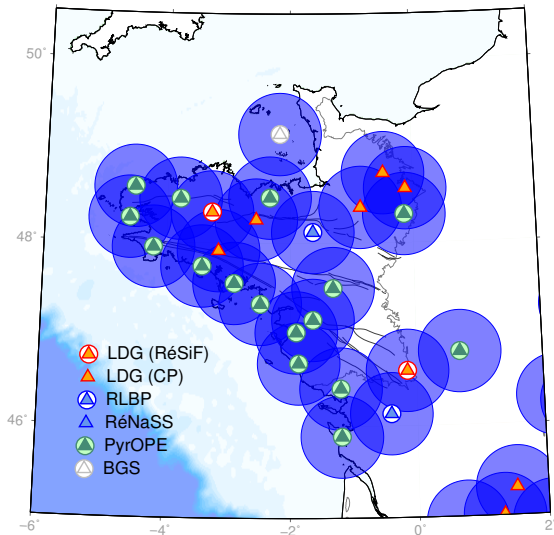
1. Méthodes de localisation hypocentrale
2. Développement méthodologique
3. Traitement des données
4. Vannes : une expérience post-séisme
5. **PYROPE : sismicité entre 2011 et 2013**

Conclusion & perspectives

— avant 2008 —



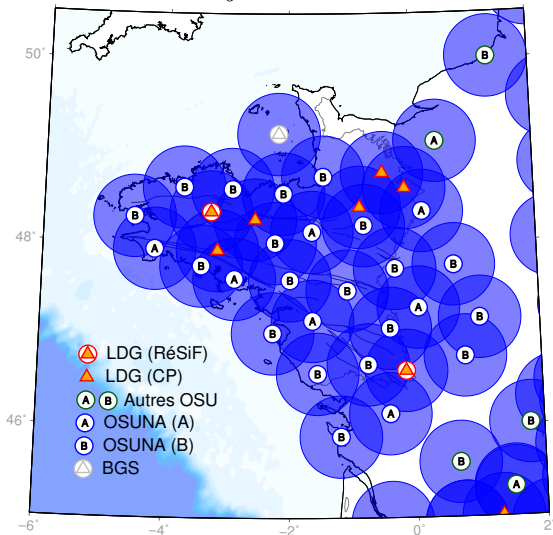
2011 – 2013



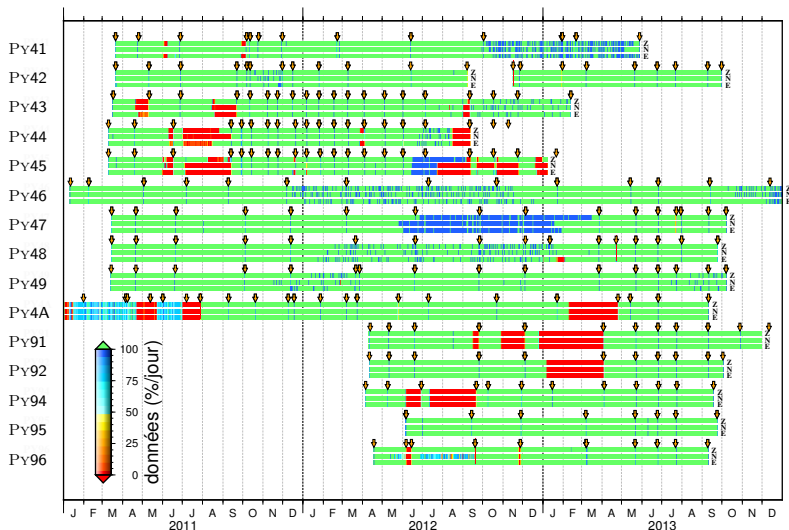
PYROPE et PYROPE+ : Chevrot & coll. (2014)



– objectif 2020 –



Complétude des données

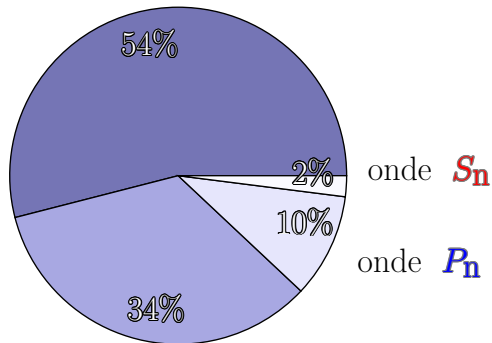


260 000 h – 100 Hz – taux de fonctionnement de 94%

O. Quillard, P. Gernigon et É. Beucler

fusion bulletin (RÉNASS+LDG)
entre 03/2011 – 09/2013 (2,5 ans) : 307 séismes

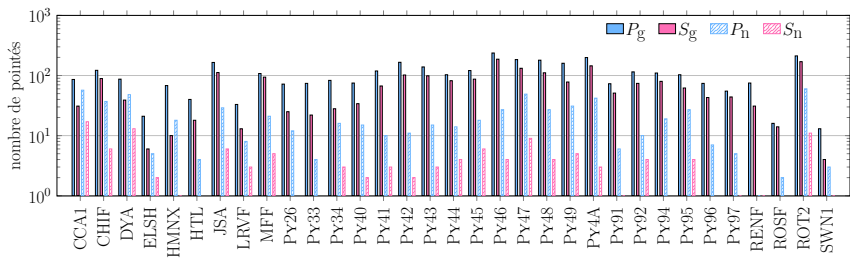
onde P_g



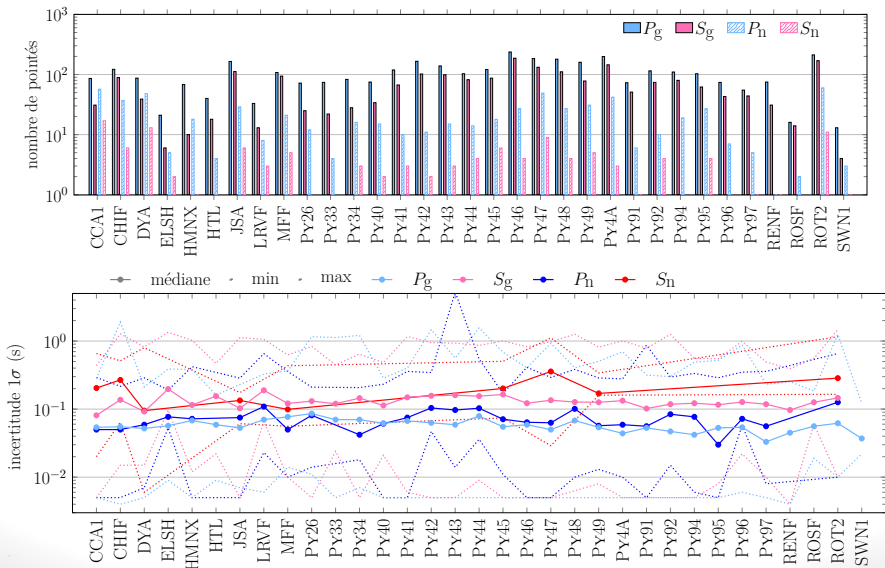
onde S_g

7 000 pointés

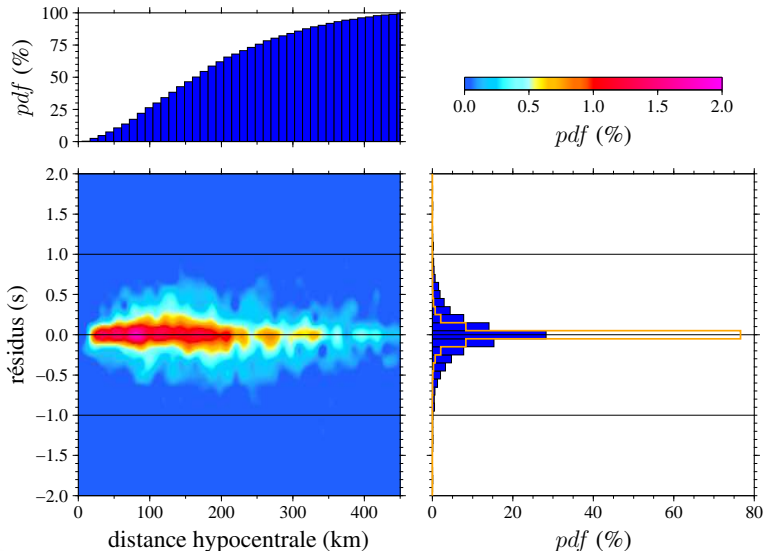
Dépouillement des données



Dépouillement des données

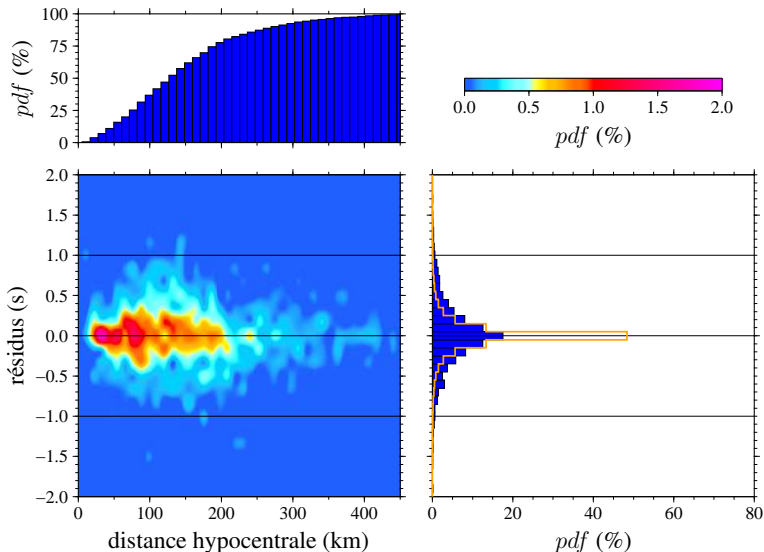


307 localisations individuelles (2,5 ans)



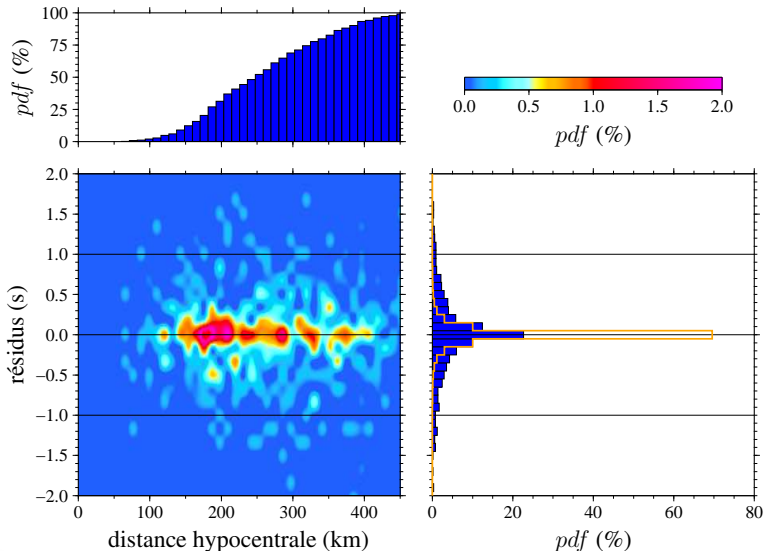
onde P_g (54% des données)

307 localisations individuelles (2,5 ans)



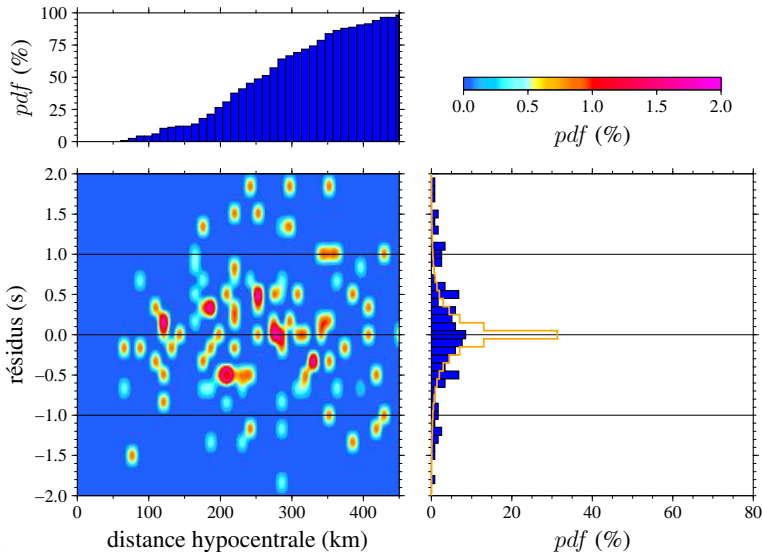
onde S_g (34% des données)

307 localisations individuelles (2,5 ans)



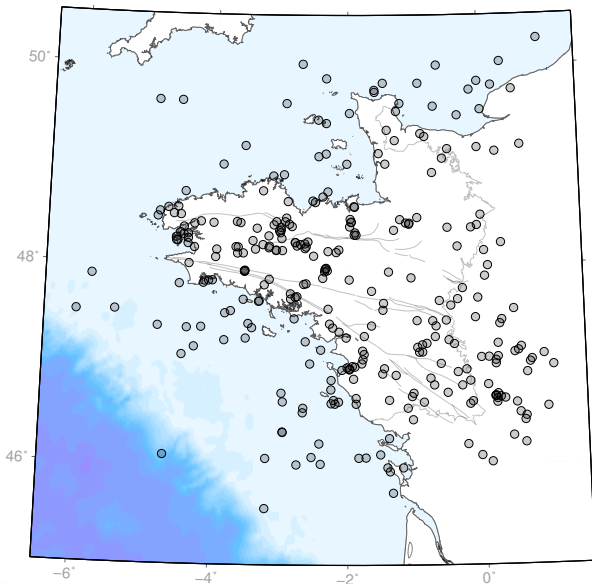
onde P_n (10% des données)

307 localisations individuelles (2,5 ans)



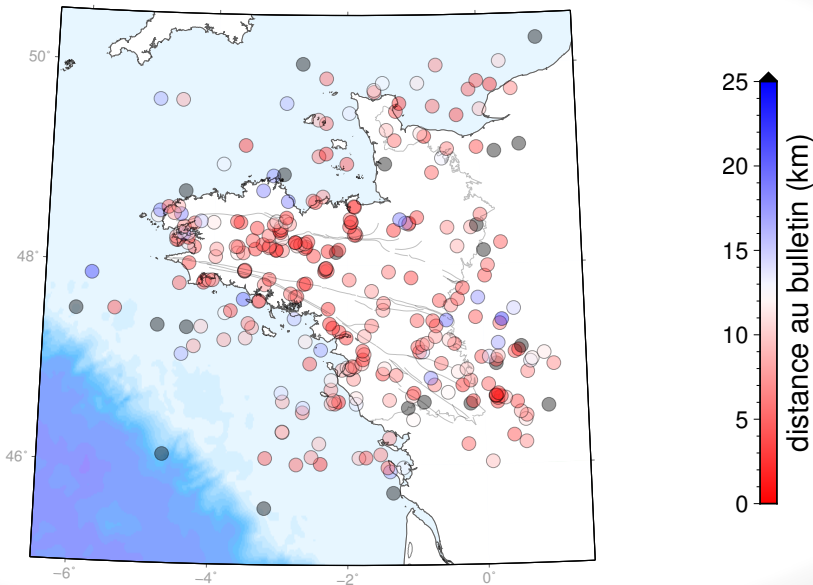
onde S_n (2% des données)

307 localisations individuelles (2,5 ans)

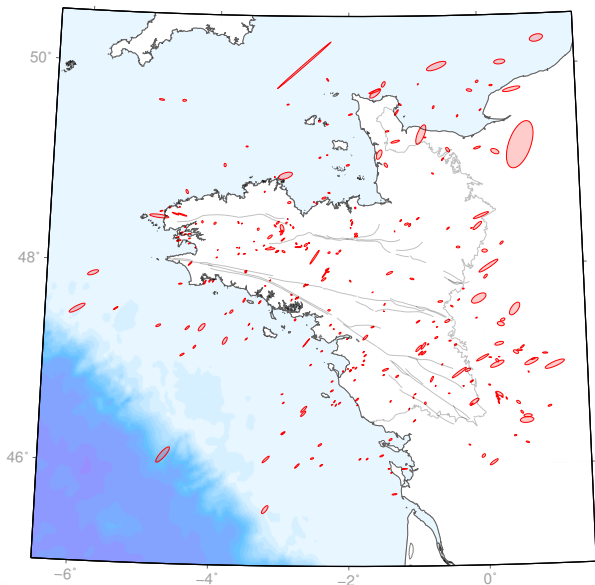


307 localisations : moyenne 1 000 meilleurs modèles

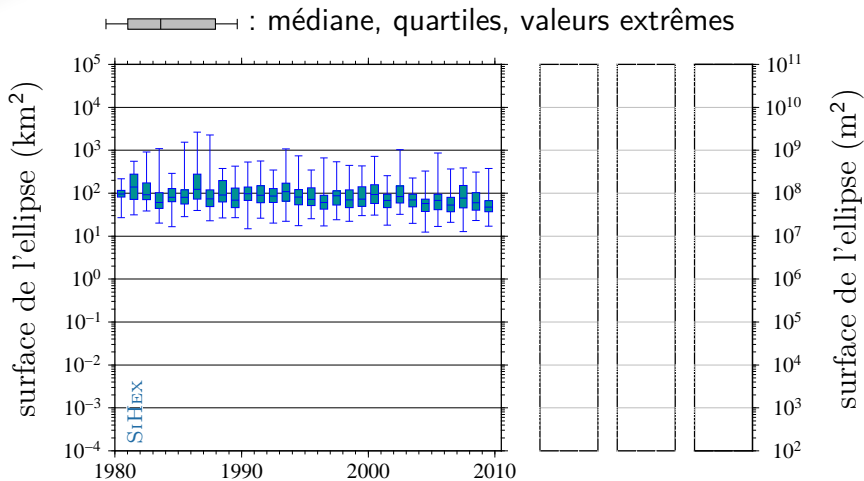
307 localisations individuelles (2,5 ans)




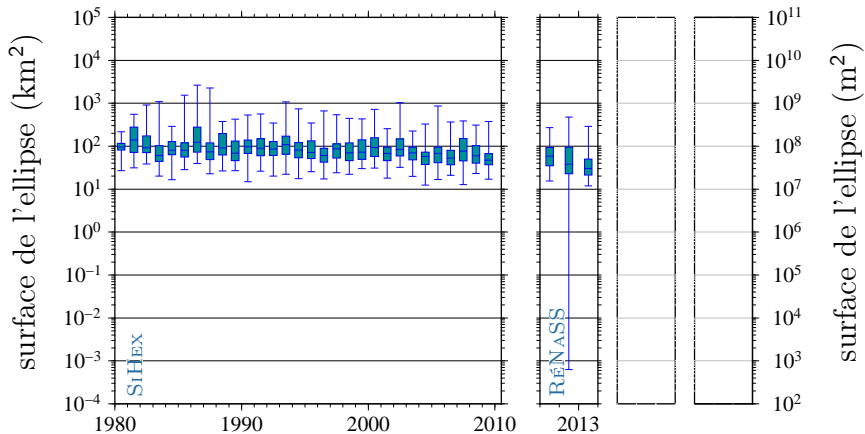
307 localisations individuelles (2,5 ans)




ellipses d'incertitudes épacentrales 5σ (confiance > 99,99997%)

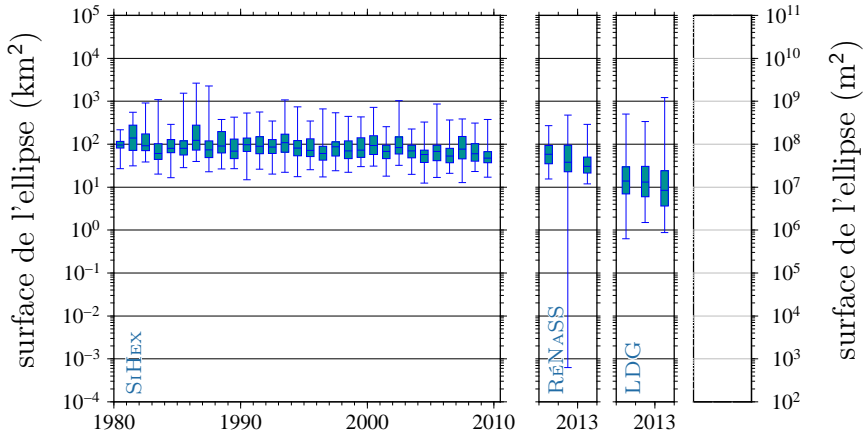


 : médiane, quartiles, valeurs extrêmes




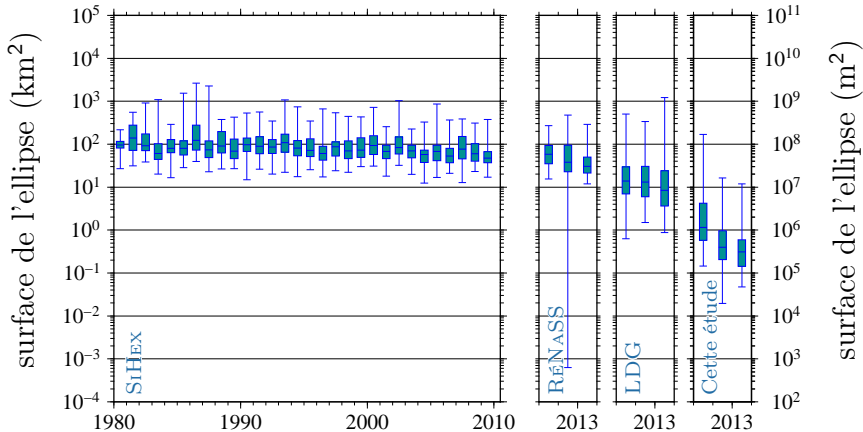
307 localisations individuelles (2,5 ans)

 : médiane, quartiles, valeurs extrêmes

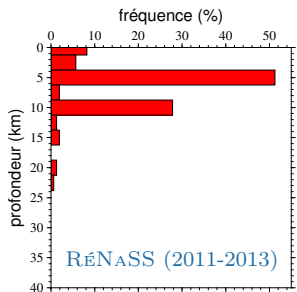
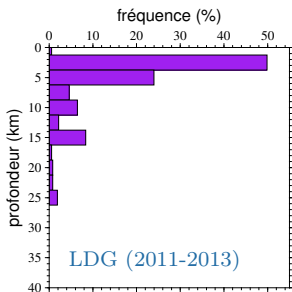
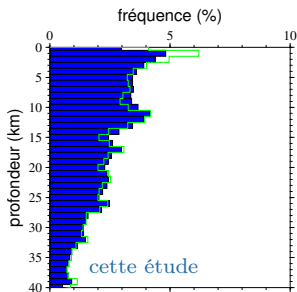
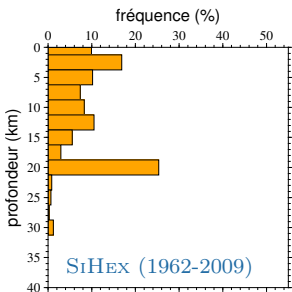


307 localisations individuelles (2,5 ans)

 : médiane, quartiles, valeurs extrêmes



307 localisations individuelles (2,5 ans)



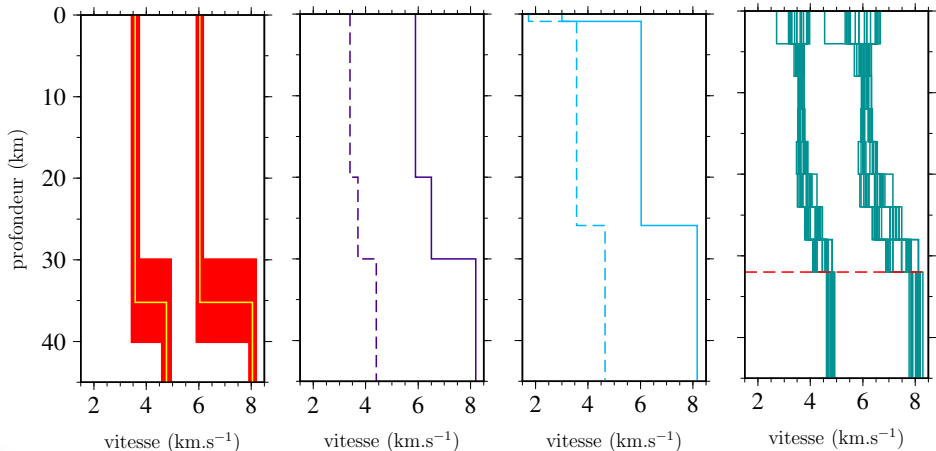
307 localisations individuelles (2,5 ans)

$(\mu \pm 1\sigma)$

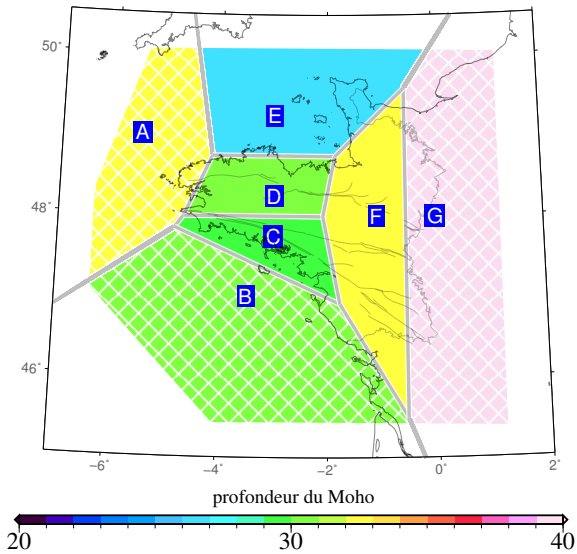
RÉNASS

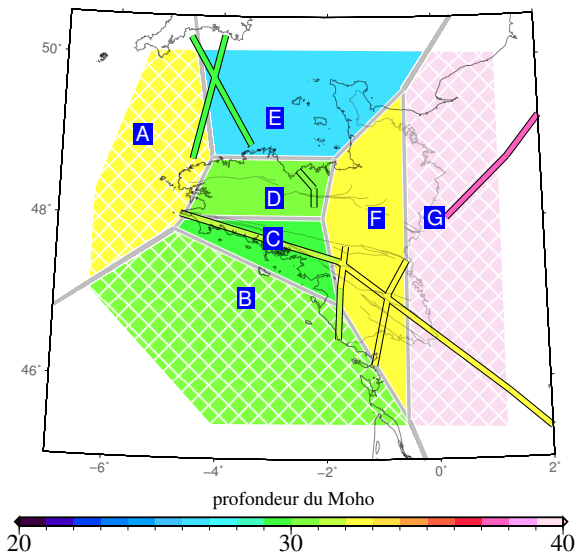
LDG

Arroucau (2006)

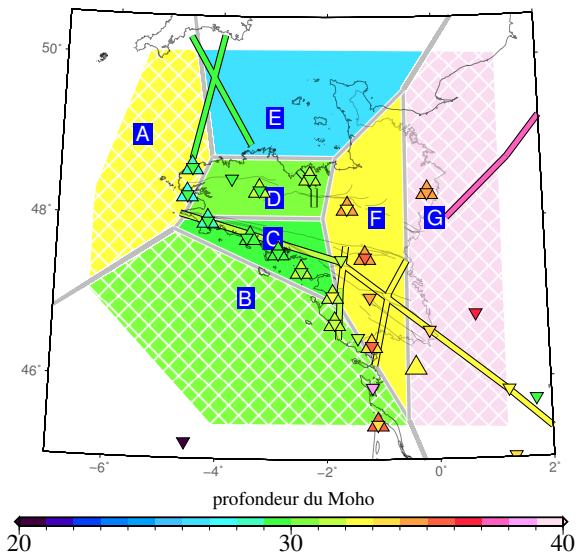


localisations simultanées





Sapin & Prodehl (1973), Bois & ÉCORS scientific party (1988, 1990),
 Bitri & coll. (2001), Bitri & coll. (2010)



Vergne & Beucler, *comm. pers.* (2013), Chevrot & coll. (2014)

Introduction

1. Méthodes de localisation hypocentrale
2. Développement méthodologique
3. Traitement des données
4. Vannes : une expérience post-séisme
5. PYROPE : sismicité entre 2011 et 2013

Conclusion & perspectives

Développement d'une méthode originale adaptée aux régions dont la structure est estimée avec de larges incertitudes

Valorisation des données PYROPE et PYROPE+
↳ 7 000 pointés

Localisation précise de 350 séismes

séisme de La Rochelle (28/04/16, $M_L=4,9$) → Rapport BCSF

Observation

Localisation des séismes

Utilisation des tirs de
carrières

Organisation de futures
campagnes post-séismes

Méthode développée

Utilisation dans d'autres
contextes géologiques

Données

+ ondes PmP

Outils d'aide au pointé manuel avec σ

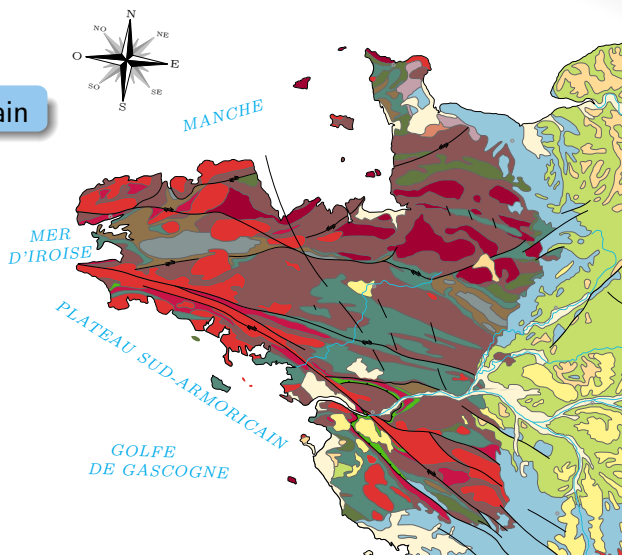
Ajout de paramètres de structure

- pendage du Moho
- gradient de vitesse
- discontinuité intracrustale
- plusieurs $\frac{\alpha}{\beta}$
- séisme sous le Moho

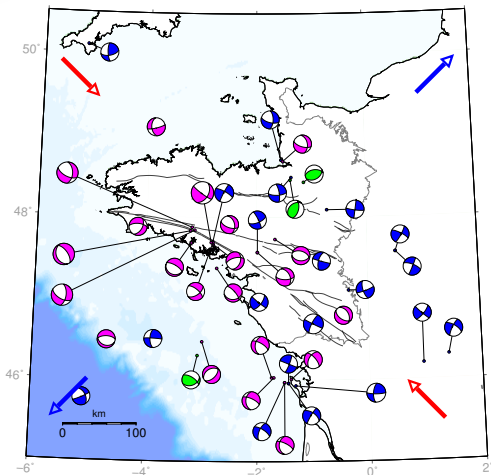
→ méthodes bayésiennes
transdimensionnelles (Green, 1995)

Sur le Massif armoricain

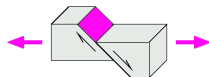
- sismicité diffuse
- structure 3D



Champs de contrainte



failles normales



failles inverses

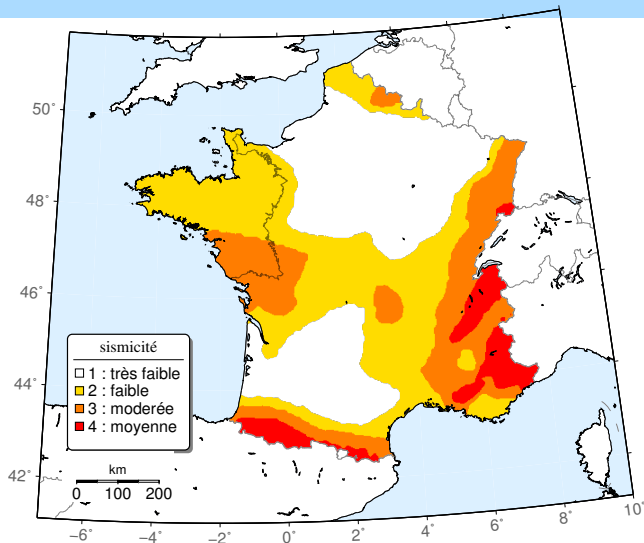


failles transformantes



Localisation → mécanismes au foyer → champs de contrainte

Nicolas & coll. (1990) ; Delouis & coll. (1993) ; Amorèse & coll. (2000) ; Mazabraud & coll. (2005) ; Perrot & coll. (2005) ; Hernandez & coll. (2014).



Localisation → Aléa → Risque → Zonage Sismique

décret n°2010-1255 (22/10/2010)

Je tiens à remercier :

Éric BEUCLER, Antoine MOCQUET, Jacques DÉVERCHÈRE,
Bertrand DELOUIS, Jean VAN DEN DRIESSCHE, Sophie
LAMBOTTE et Thomas BODIN

Ianis GAUDOT, Mélanie DRILLEAU, Geoffrey AERTGEERTS,
Mickaël BONNIN, Olivier VERHOEVEN, Olivier DAUTEUIL, Pascal
BERNARD, Philippe CANCE, ...

Olivier QUILLARD, Pierrick GERNIGON, Sébastien CHEVROT,
Julie PERROT, Yoann CANO, Sophie MERRER, David
WOLYNIEC, ...

L'ensemble du Labo !

Ma famille, mes ami(e)s, Mélissa

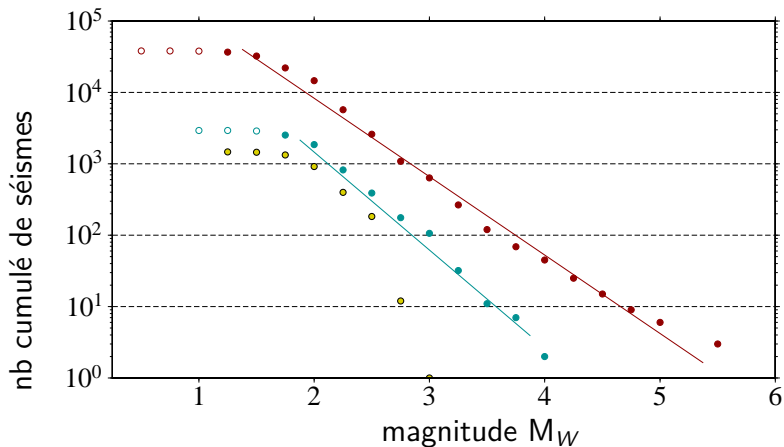
Détermination non-linéaire des paramètres hypocentaux et structuraux : application à la sismicité intracontinentale du Massif armoricain

Méric HAUGMARD

jury : *Rapporteurs* : B. DELOUIS & J. DÉVERCHÈRE
Examineurs : J. VAN DEN DRIESSCHE, S. LAMBOTTE & T. BODIN
Encadrants : A. MOCQUET & É. BEUCLER

- le 14 octobre 2016 -

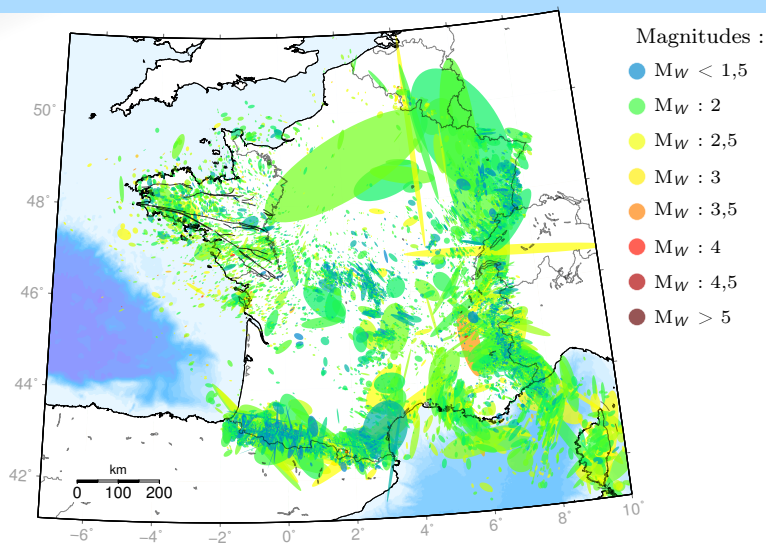




Loi de Gutenberg-Richter

Sismicité **métropolitaine**, **armoricaine** et **non tectonique**

entre 1962 et 2009 **SiHEX** (Cara & coll., 2015)



Incertitude épicentrale

entre 1962 et 2009 SiHEX (Cara & coll., 2015)

Prior : $\mathbb{P}(\mathbf{p})$

une étendue vaste

une distribution uniforme

- vitesses supérieures dans le manteau ($\alpha_n \gg \alpha_1$)
- séismes au-dessus du Moho

Prior : $\mathbb{P}(\mathbf{p})$

une étendue vaste

une distribution uniforme

- vitesses supérieures dans le manteau ($\alpha_n \gg \alpha_1$)
- séismes au-dessus du Moho

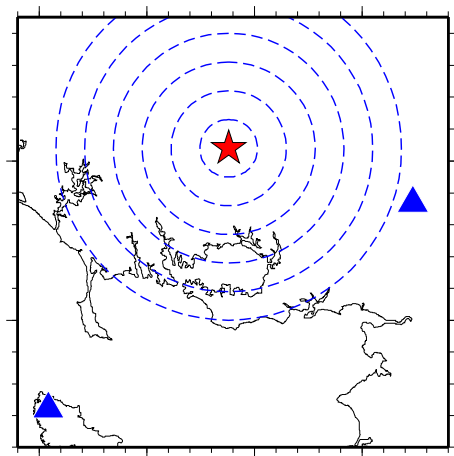
Modèles initiaux : \mathbf{p}_1

tiré aléatoirement dans le prior

- sauf pour le temps origine (t_0)
- sauf pour l'épicentre (λ, ϕ) : ordre d'arrivées des ondes

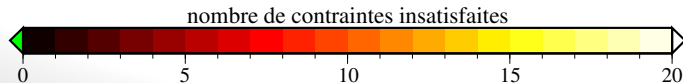
Localisation par ordre d'arrivées

indépendant de la structure



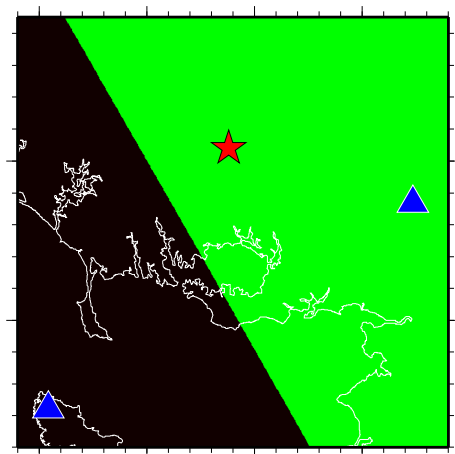
(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)

2 stations



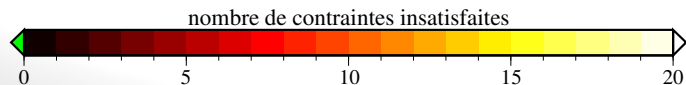
Localisation par ordre d'arrivées

indépendant de la
structure



(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)

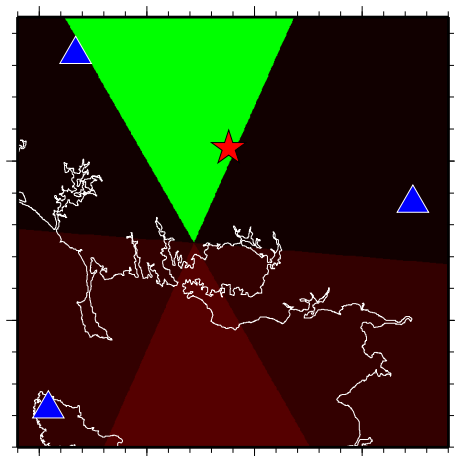
2 stations



Localisation par ordre d'arrivées

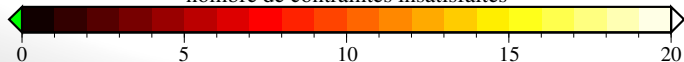
indépendant de la structure

(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)



3 stations

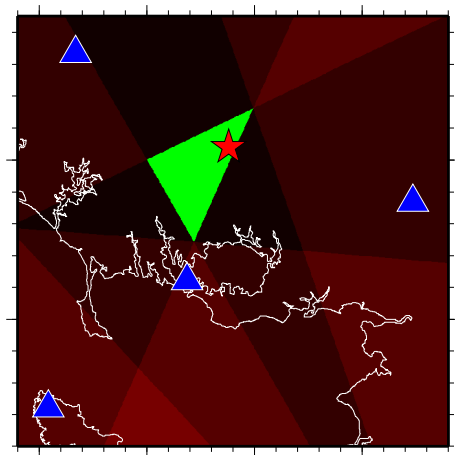
nombre de contraintes insatisfaites



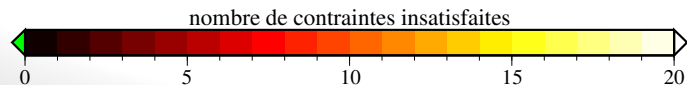
Localisation par ordre d'arrivées

indépendant de la structure

(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)



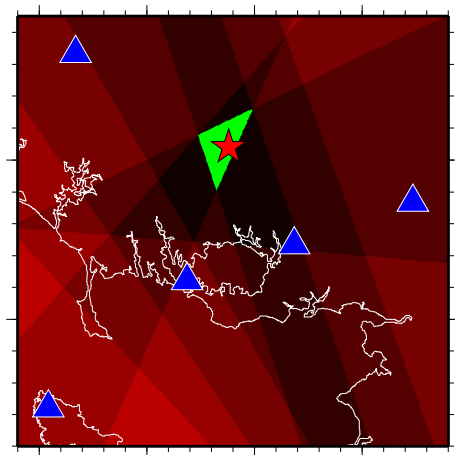
4 stations



Localisation par ordre d'arrivées

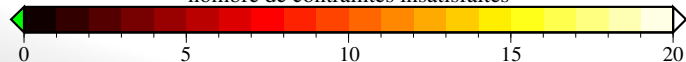
indépendant de la
structure

(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)



5 stations

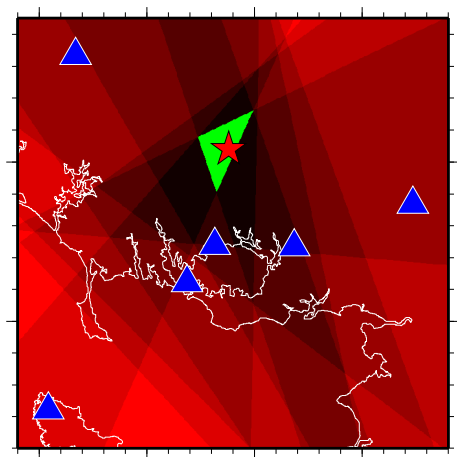
nombre de contraintes insatisfaites



Localisation par ordre d'arrivées

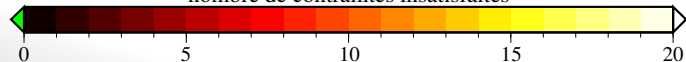
indépendant de la
structure

(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)



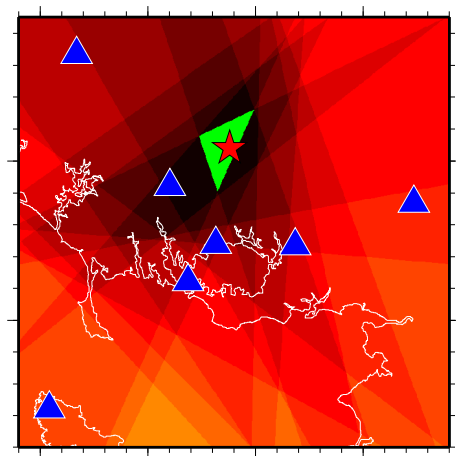
6 stations

nombre de contraintes insatisfaites



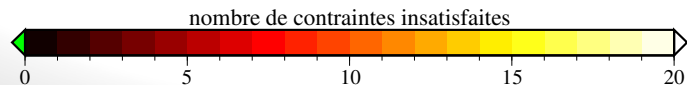
Localisation par ordre d'arrivées

indépendant de la
structure



(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)

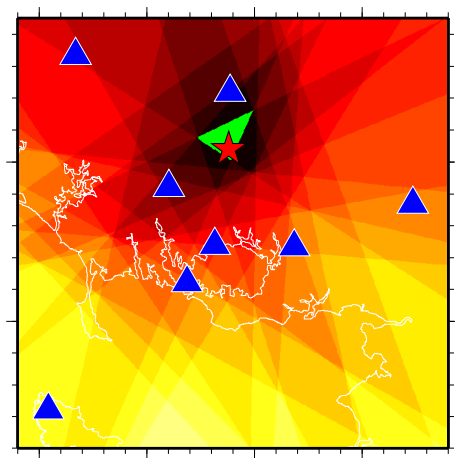
7 stations



Localisation par ordre d'arrivées

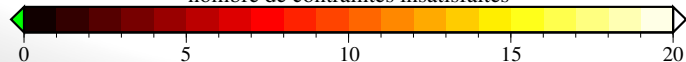
indépendant de la
structure

(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)



8 stations

nombre de contraintes insatisfaites

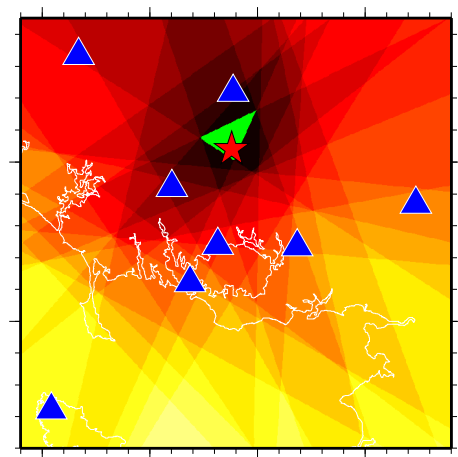


Localisation par ordre d'arrivées

indépendant de la
structure

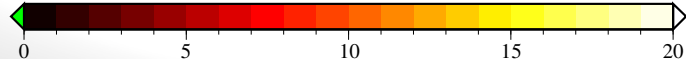
cohérence des données

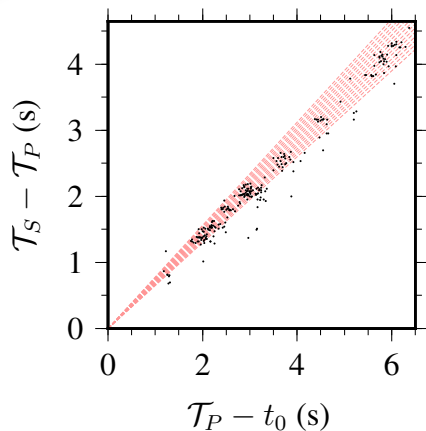
(Anderson, 1981 ; Sambridge
& Kennett, 1986)



8 stations

nombre de contraintes insatisfaites





diagrammes de [Wadati \(1933\)](#) ;

$$\frac{\alpha}{\beta} = a + 1$$

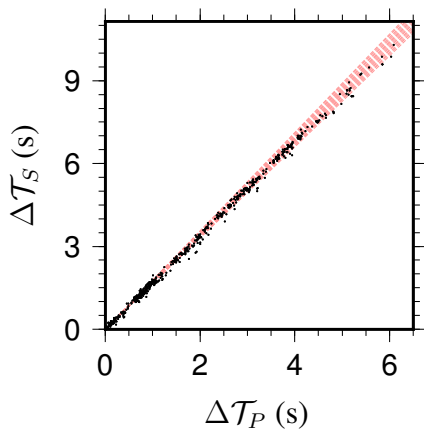
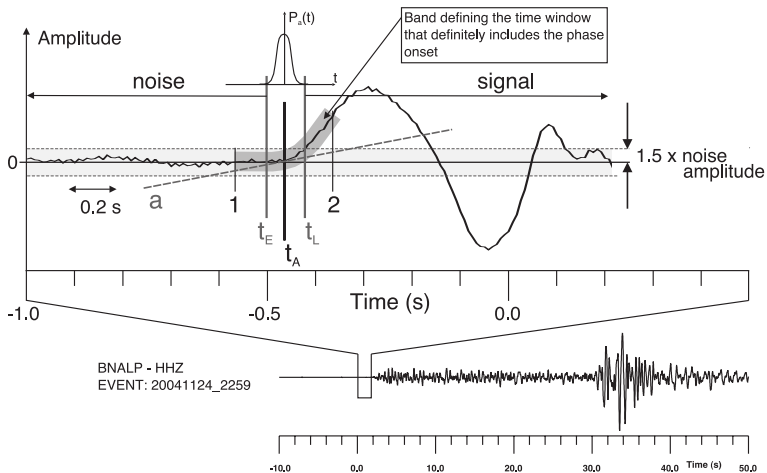
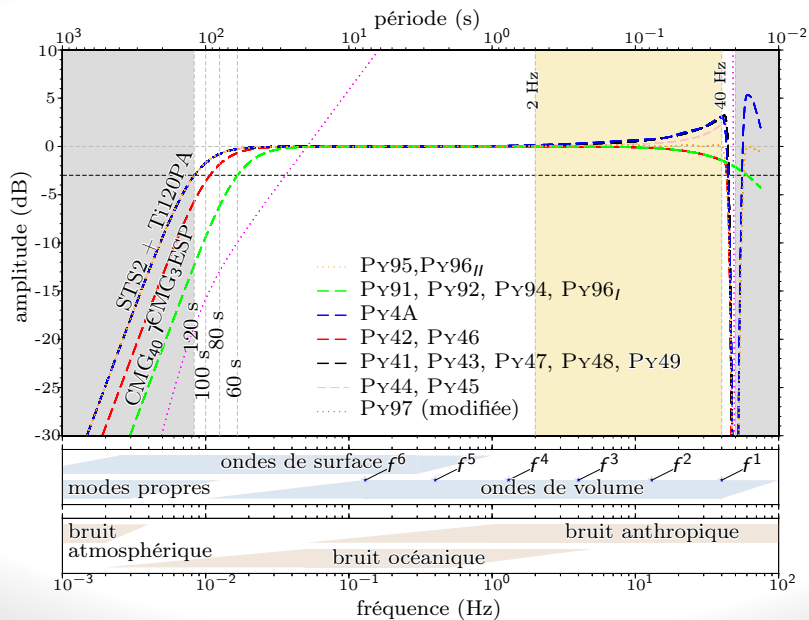


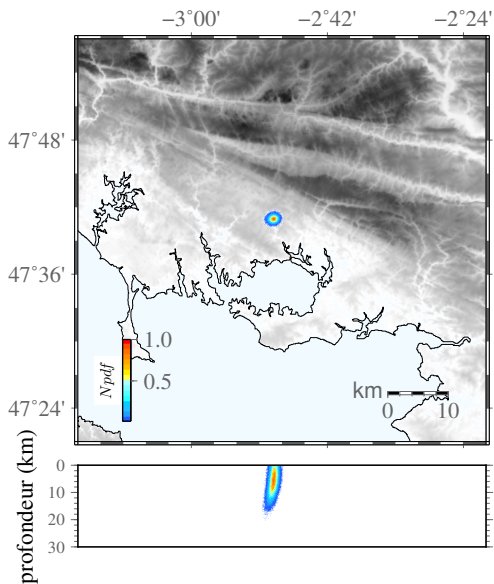
diagramme [Chatelain \(1978\)](#).

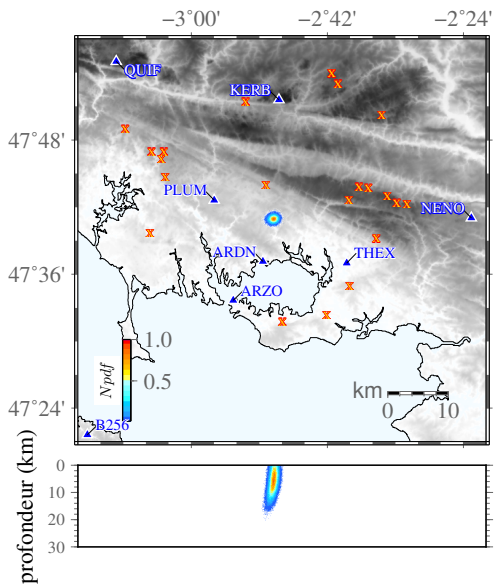
$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{a}$$

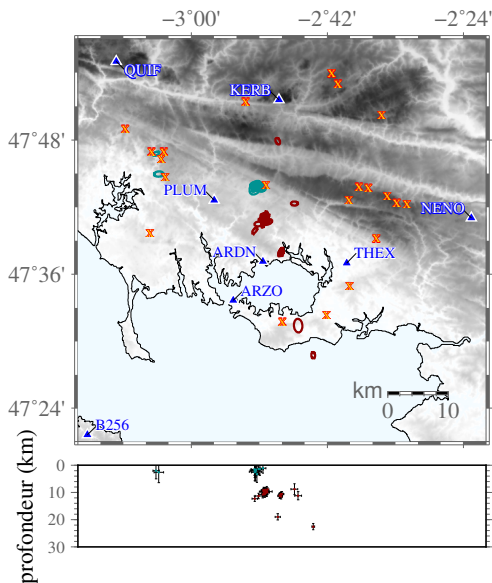


(d'après Diehl & Kissling, 2007 ; Diehl & coll., 2009)







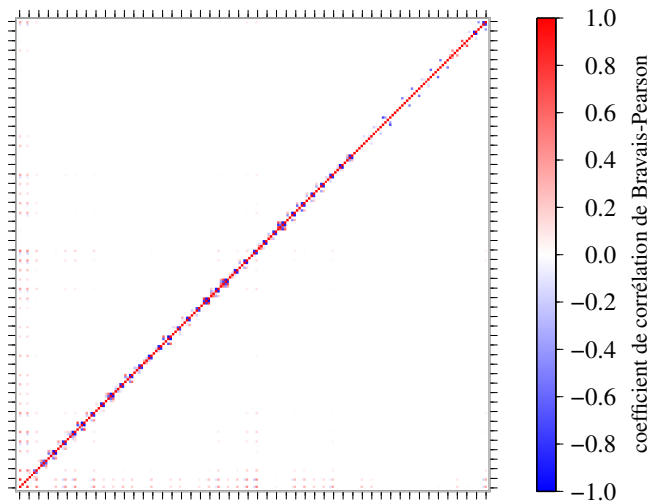


36 séismes

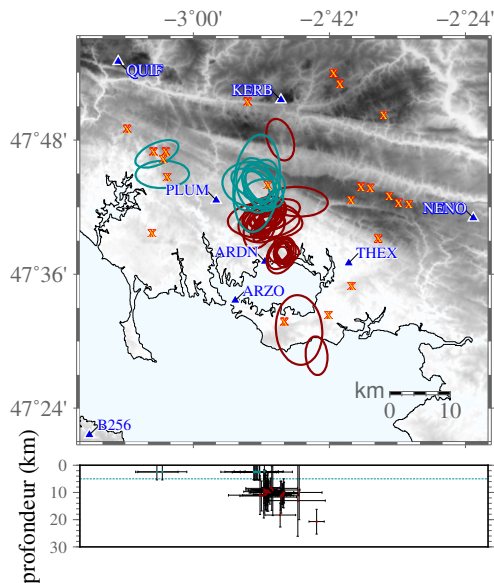
12 tirs

331 P_g 256 S_g $\alpha_1 = 6,2 \pm 0,1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ $\frac{\alpha}{\beta} = 1,69$

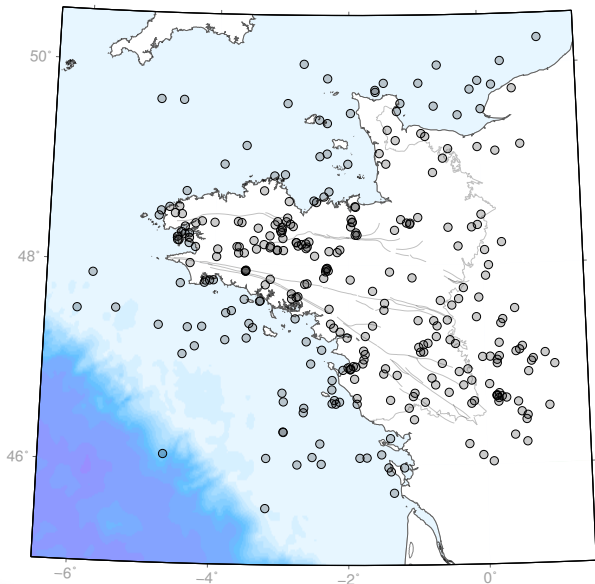
Perrot & coll. (2005)



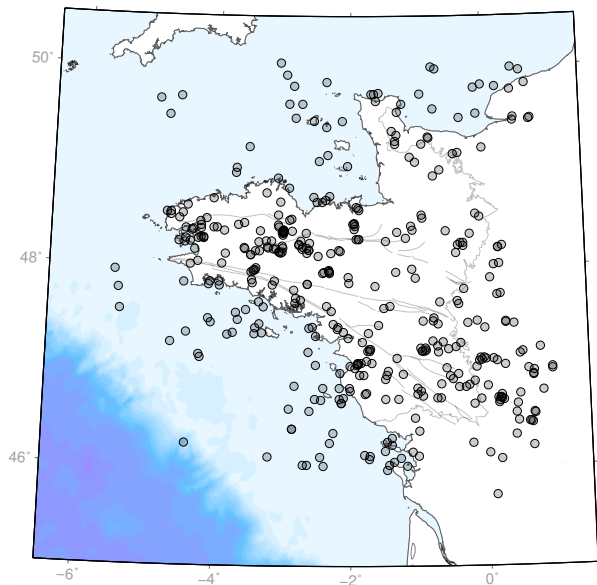
48 événements : 196 paramètres



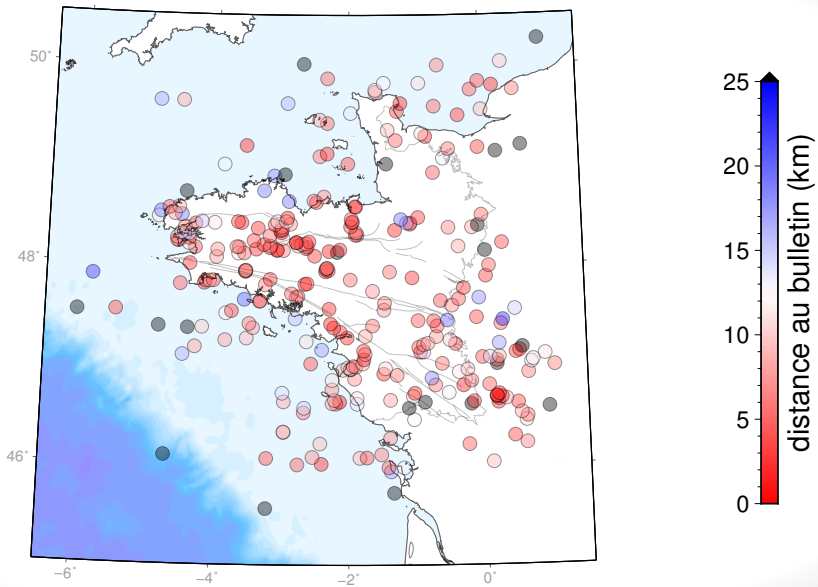
2 groupes :
23 + 9 séismes

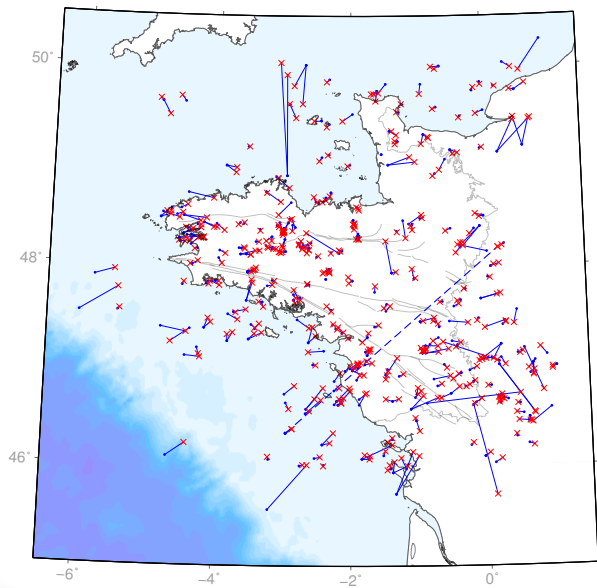


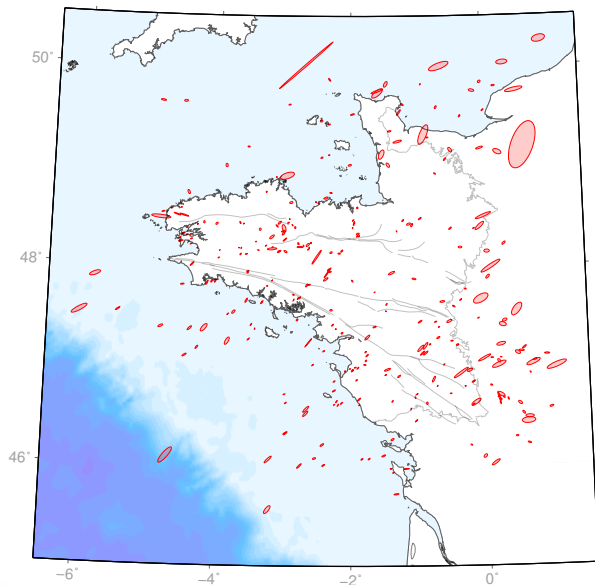
307 localisations : moyenne 1 000 meilleurs modèles



séismes du bulletin (RÉNASS + LDG)







ellipses d'incertitudes épicentrales 5σ

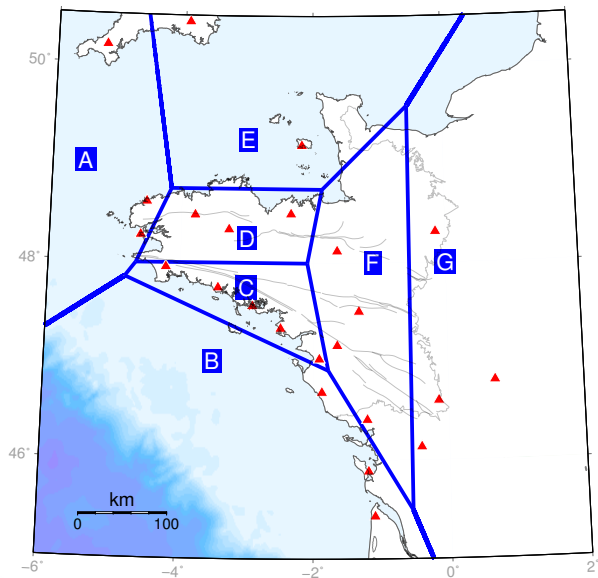
Critères de position sur les paramètres structuraux
 307 localisations individuelles
 (100 meilleurs modèles de chaque séisme)

	α_1 (km·s ⁻¹)	α_n (km·s ⁻¹)	Z_n (km)	$\frac{\alpha}{\beta}$
μ	6,04	8,05	35,0	1,69
1σ	0,16	0,17	5,2	0,04
Q_1	5,95	8,00	30,2	1,67
Q_2	6,04	8,02	37,2	1,69
Q_3	6,12	8,07	37,8	1,71

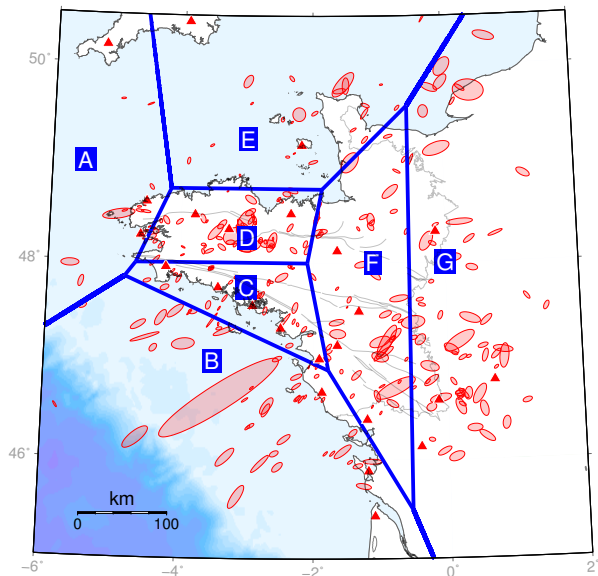
Critères de position sur les paramètres structuraux
307 localisations individuelles
(100 meilleurs modèles de chaque séisme)

	α_1 (km·s ⁻¹)	α_n (km·s ⁻¹)	Z_n (km)	$\frac{\alpha}{\beta}$
μ	6,04	8,05	35,0	1,69
1σ	0,16	0,17	5,2	0,04
Q_1	5,95	8,00	30,2	1,67
Q_2	6,04	8,02	37,2	1,69
Q_3	6,12	8,07	37,8	1,71

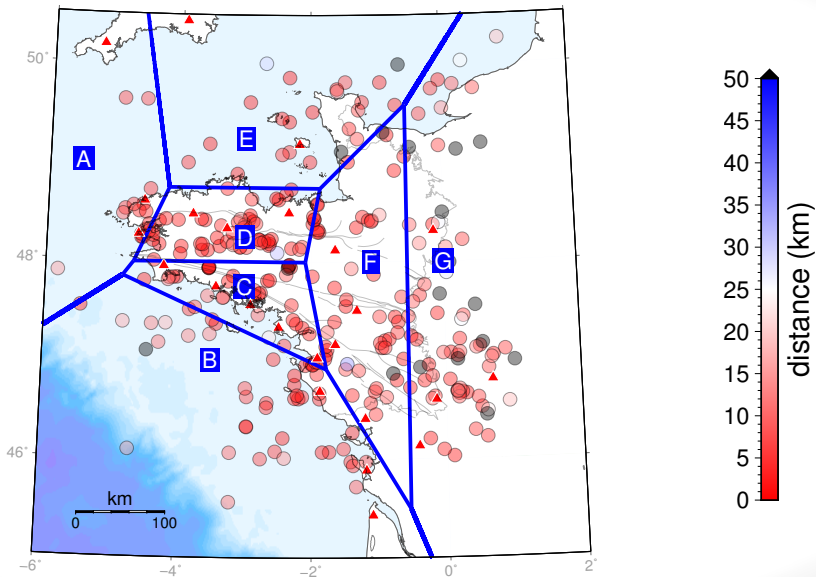
→ en accord avec les hodochrones et les diagrammes de [Wadati \(1933\)](#)
et [Chatelain \(1978\)](#).

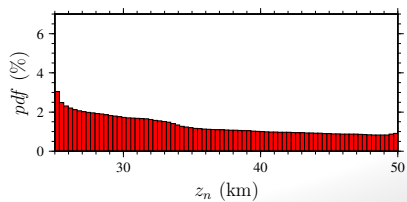
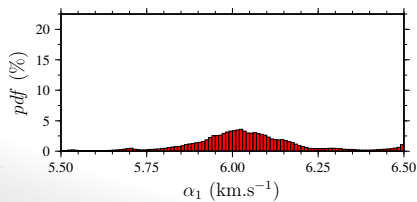
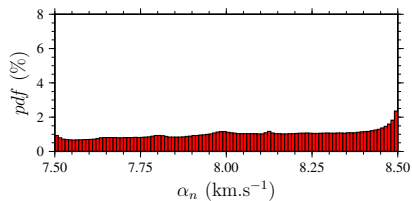
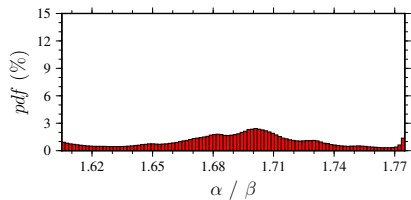
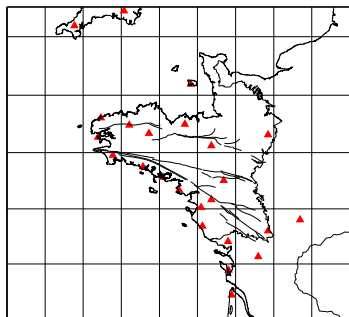


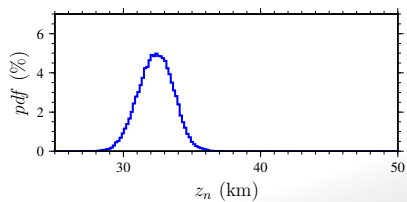
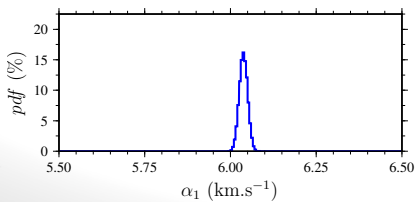
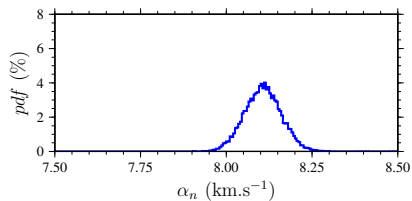
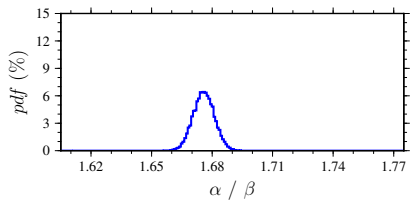
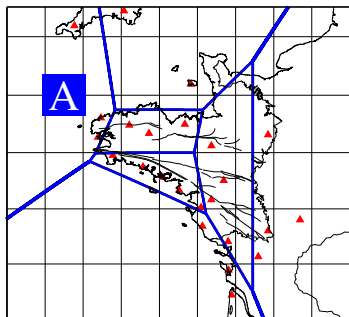
7 cellules de Voronoï

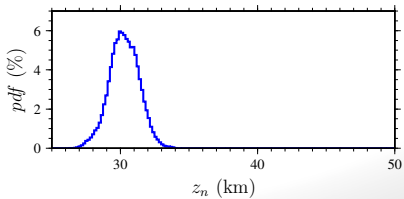
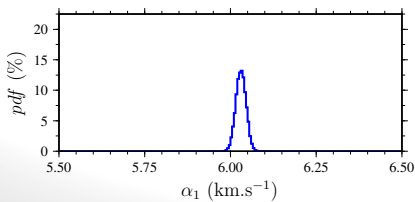
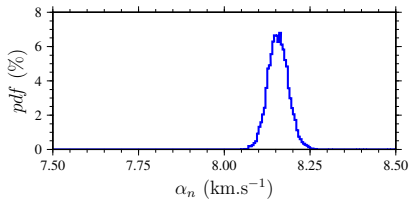
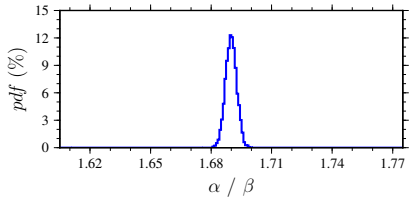
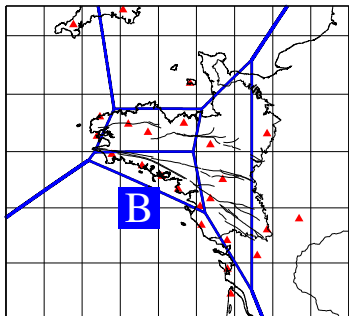


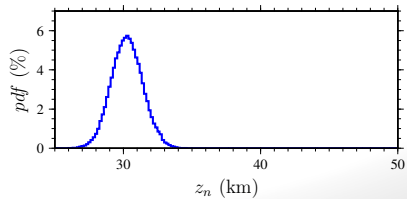
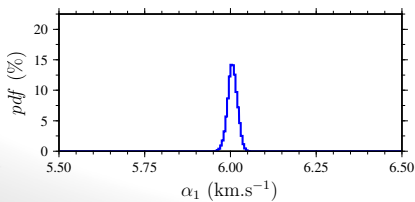
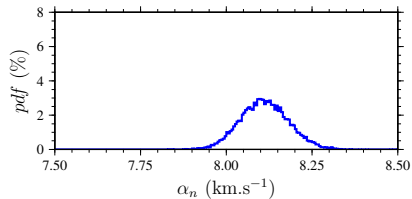
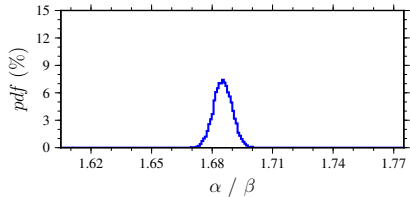
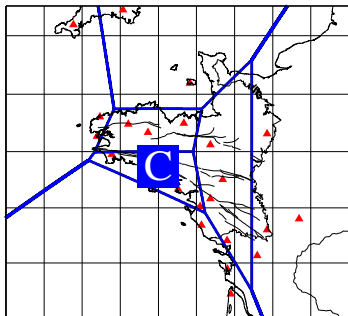
ellipses d'incertitudes épacentrales 5σ

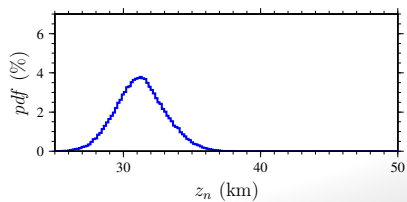
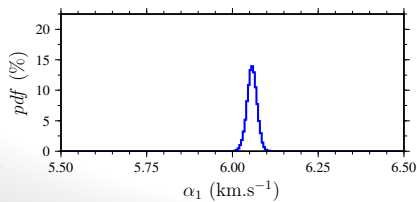
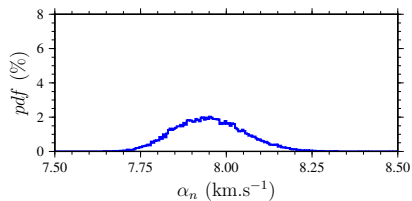
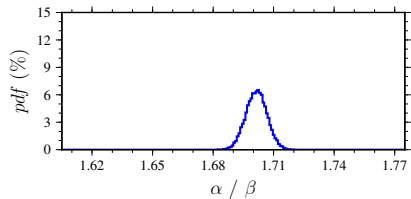
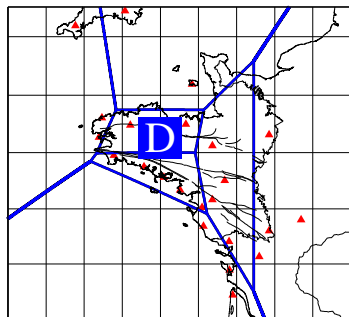


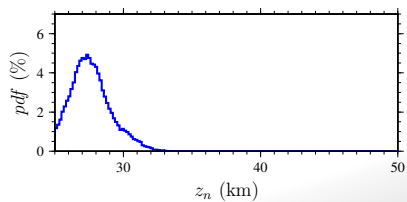
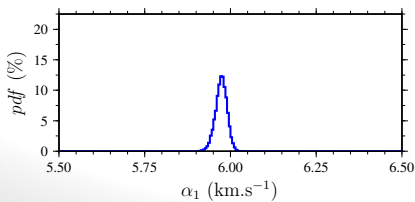
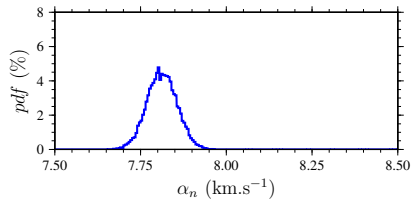
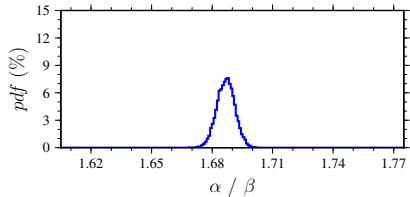
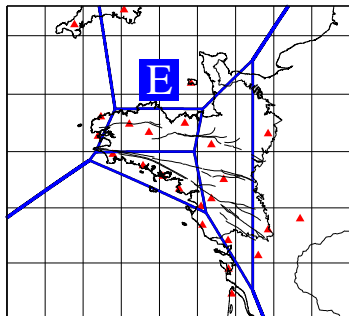


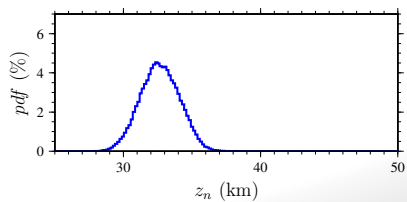
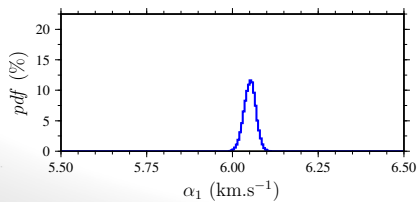
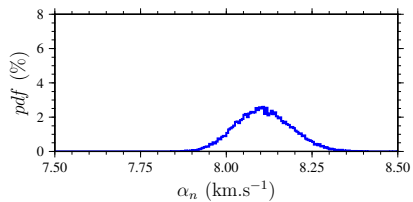
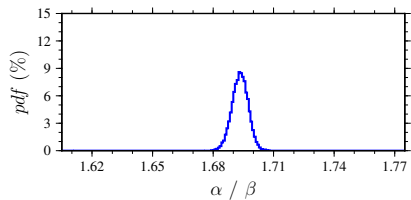
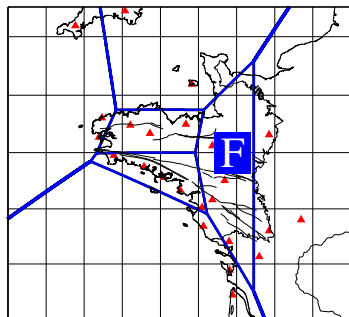


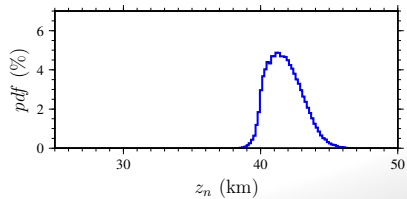
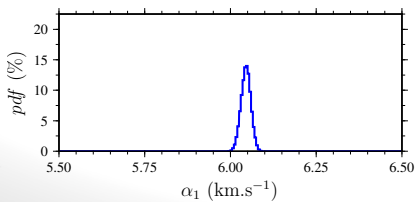
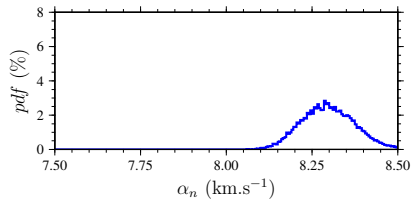
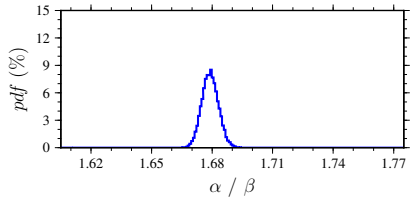
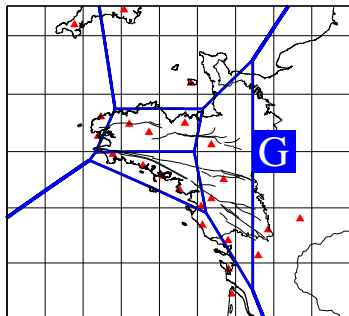





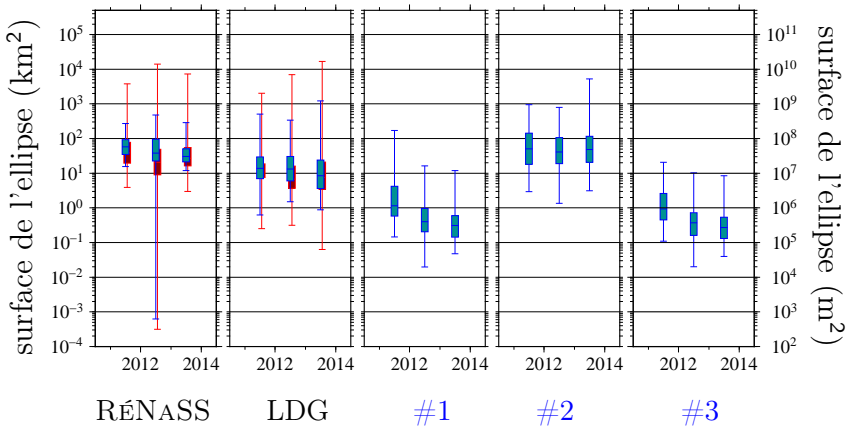


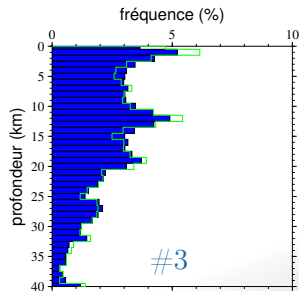
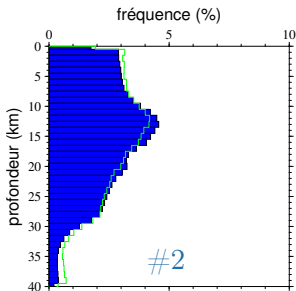
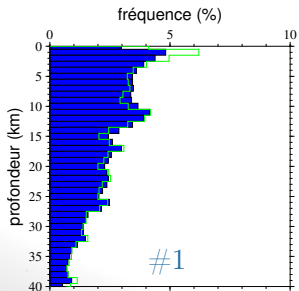
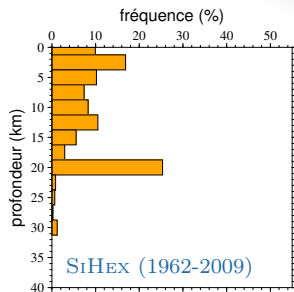
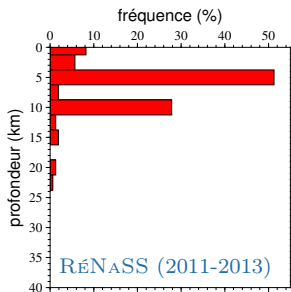
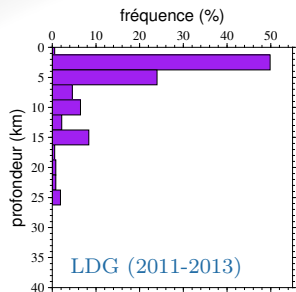






 : médiane, quartiles, valeurs extrêmes





Bibliographie :

- ALLEN, R. V. (1978), Automatic earthquake recognition and timing from single traces, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68(5), 1521–1532.
- AMORÈSE, D., A. WALKER, J.-L. LAGARDE, J.-P. SANTOIRE, P. VOLANT, M. FONT & M. LECORNU (2000), New seismotectonic data from an intraplate region: Focal mechanisms in the Armorican Massif (northwestern France), *Geophys. J. Int.*, 143(3), 837–846.
- ANDERSON, K. R. (1981), Epicentral location using arrival time order, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71(2), 541–545.
- ARROUCAU, P. (2006), *Sismicité du Massif armoricain : relocalisations et interprétation tectonique*, thèse de troisième cycle, LPG Nantes, Université de Nantes, 230 p..
- BAILLARD, C., W. C. CRAWFORD, V. BALLU, C. HIBERT & A. MANGENEY (2014), An automatic kurtosis-based P-and S-phase picker designed for local seismic networks, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104(1), 394–409.
- BAYES, T. & R. PRICE (1763), An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. By the late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. Communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, A. M. F. R. S., *Philos. Trans.*, 53(0), 370–418.
- BIRD, P. (2003), An updated digital model of plate boundaries, *G³*, 4(3), 52, 1027.
- BITRI, A., J.-P. BRUN, C. TRUFFERT & P. GUENOC (2001), Deep seismic imaging of the Cadomian thrust wedge of Northern Brittany, *Tectonophysics*, 331, 65–80.
- BITRI, A., J.-P. BRUN, D. GAPAIS, F. CAGNARD, C. GUMIAUX, J. CHANTRAINE, G. MARTELET & C. TRUFFERT (2010), Deep reflection seismic imaging of the internal zone of the South Armorican Hercynian belt (western France) (ARMOR 2/Géofrance 3D Program), *C. R. Geoscience*, 342(6), 448–452.

- BOIS, C. & ÉCORS SCIENTIFIC PARTY (1988), Major crustal features disclosed by the ÉCORS deep seismic profiles, *Ann. Soc. Géol. Belgique*, 11(2), 2570–277.
- BOIS, C. & ÉCORS SCIENTIFIC PARTY (1990), Seismic Probing of Continents and their Margins Major geodynamic processes studied from the ÉCORS deep Seismic profiles in France and adjacent areas, *Tectonophysics*, 173(1), 397–410.
- CARA, M., Y. CANSI, A. SCHLUPP, P. ARROUCAU, N. BÉTHOUX, É. BEUCLER, S. BRUNO, M. CALVET, S. CHEVROT, A. DEBOISSY, B. DELOUIS, M. DENIEUL, A. DESCHAMPS, C. DOUBRE, J. FRÉCHET, S. GODEY, O. GOLLE, M. GRUNBERG, J. GUILBERT, M. HAUGMARD, L. JENATTON, S. LAMBOTTE, D. LEOBAL, C. MARON, V. MENDEL, S. MERRER, M. MACQUET, A. MIGNAN, A. MOCQUET, M. NICOLAS, J. PERROT, B. POTIN, O. SANCHEZ, J.-P. SANTOIRE, O. SÈBE, M. SYLVANDER, F. THOUVENOT, J. VAN DER WOERD & K. VAN DER WOERD (2015), Si-HEX: A new catalogue of instrumental seismicity for metropolitan France, *Bull. Soc. Géol. France*, 186(1), 3–19.
- CHATELAIN, J. L. (1978), *Étude fine de la sismicité en zone de collision continentale à l'aide d'un réseau de stations portables : la région Hindu-Kush-Pamir*, thèse de troisième cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 219 p..
- CHEVROT, S., A. VILLASENOR, M. SYLVANDER, S. BENAHMED, É. BEUCLER, G. COUGOULAT, P. DELMAS, M. DE SAINT BLANQUAT, J. DIAZ, J. GALLART, F. GRIMAUD, Y. LAGABRIELLE, G. MANATSCHAL, A. MOCQUET, H. PAUCHET, A. PAUL, C. PEQUEGNAT, O. QUILLARD, S. ROUSSEL, M. RUIZ & D. WOLYNIEC (2014), High-resolution imaging of the Pyrenees and Massif Central from the data of the PYROPE and IBERARRAY portable array deployments, *J. Geophys. Res.*, 119(8), 6399–6420.
- DANTZIG, G. B., A. ORDEN, P. WOLFE & OTHERS (1955), The generalized simplex method for minimizing a linear form under linear inequality restraints, *Pacific J. Mathematics*, 5(2), 183–195.
- DELOUIS, B., H. HAESSLER, A. CISTERNAS & L. RIVERA (1993), Stress tensor determination in France and neighbouring regions, *Tectonophysics*, 221(3–4), 413–438.

- DIEHL, T. & E. KISSLING (2007), Users guide for consistent phase picking at local to regional scales, *ETH Zurich, Switzerland*, 37 p..
- DIEHL, T., E. KISSLING, S. HUSEN & F. ALDERSONS (2009), Consistent phase picking for regional tomography models: Application to the greater Alpine region, *Geophys. J. Int.*, 176(2), 542–554.
- DOUGLAS, A. (1967), Joint hypocenter determination, *Nature*, 215, 47–48.
- EATON, J. P. (1970), *HYPOLAYR, a computer program for determining hypocenters of local earthquakes in an earth consisting of uniform flat layers over a half space*, 69–85, USGS Open File Report, 155 p.
- FRÉCHET, J., F. THOUVENOT & M. FROGNEUX (2011), The M_W 4.5 Vallorcine (French Alps) earthquake of 8 September 2005 and its complex aftershock sequence, *J. Seismol.*, 1, 43–58.
- GEIGER, L. C. (1910), Herbsetimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten, *K. Gessell. Will. Goett*, 4, 331–349.
- GEIGER, L. C. (1912), Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, *Bull. St. Louis Univ.*, 8(1), 60–71.
- GELMAN, A., J. B. CARLIN, H. S. STERN, D. B. DUNSON, A. VEHTARI & D. B. RUBIN (2013), *Bayesian Data Analysis*, 656 p., Taylor & Francis, 3^e Éd..
- GRAD, M., T. THIRA & ESC WORKING GROUP (2009), The Moho depth map of the European Plate, *Geophys. J. Int.*, 176(1), 279–292.
- GREEN, P. J. (1995), Reversible jump Markov chain Monte Carlo computation and Bayesian model determination, *Biometrika*, 82, 711–732.
- HERNANDEZ, B., A. GUILHEM, L. BOLLINGER, Y. CANO & J.-P. SANTOIRE (2014), Séisme de Vannes (Morbihan) du 21 novembre 2013, *RST*, Pau, 27-31 octobre.
- HERRMANN, R. B. (1979), FASTHYPO – A Hypocenter Location Program, *Seism. Res. Lett.*, 50(2), 25–38.

- JUDENHERC, S. (2000), *Etude et caractérisation des structures hercyniennes à partir de données sismologiques : le cas du Massif armoricain*, thèse de troisième cycle, IPGS, Université Strasbourg I, 147 p.
- KIM, W., I.-K. HAHM, S. JIN AHN & D. HOON LIM (2006), Determining hypocentral parameters for local earthquakes in 1-D using a genetic algorithm, *Geophys. J. Int.*, 166(2), 590–600.
- KLEIN, F. W. (2002), *User's guide to HYPOINVERSE-2000: A Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes*, vol. 02–171, USGS Open File Report.
- LEE, W. H. K. & J. LAHR (1975), *HYPO71 (Revised) : A computer program for determining hypocenter, magnitude and first-motion pattern of local earthquakes*, USGS Open File Report, 113 p.
- LIENERT, B. R., E. BERG & L. N. FRAZER (1986), HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 771–783.
- LOMAX, A., J. VIRIEUX, P. VOLANT & C. BERGE (2000), Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, dans *Advances in Seismic Event Location, Modern Approaches in Geophysics*, vol. 18, édité par C. H. Thurber & N. Rabinowitz, p. 101–134, Springer Netherlands.
- MARKOV, A. A. (1913), Essai d'une recherche statistique sur le texte du roman « Eugène Onéguine », illustrant la liaison des épreuves en chaîne, *Bull. Acad. Imp. Sci., St.-Petersbourg*. VI série, 7(3), 153–162.
- MAZABRAUD, Y. (2004), *Déformation active d'une région intraplaque à déformation lente : le cas de la France. Sismicité et modélisations thermomécaniques 2D et 3D*, thèse de troisième cycle, Géoazur, Université de Nice Sophia-Antipolis, 220 p.
- MAZABRAUD, Y., N. BÉTHOUX, J. GUILBERT & O. BELLIER (2005), Evidence for short-scale stress field variations within intraplate central-western France, *Geophys. J. Int.*, 160(1), 161–178.
- METROPOLIS, N. & S. ULAM (1949), The Monte Carlo method, *J. Am. Stat. Ass.*, 44(247), 335–341.

- MYERS, S. C., G. JOHANNESSON & W. HANLEY (2007), A Bayesian hierarchical method for multiple-event seismic location, *Geophys. J. Int.*, 171(3), 1049–1063.
- NICOLAS, M., J. SANTOIRE & P. DELPECH (1990), Intraplate seismicity-new seismotectonic data in western-Europe, *Tectonophysics*, 179(1–2), 27–53.
- PERROT, J., P. ARROUCAU, J. GUILBERT, J. DÉVERCHÈRE, Y. MAZABRAUD, J. ROLET, A. MOCQUET, M. MOUSSEAU & L. MATIAS (2005), Analysis of the M_W 4.3 Lorient earthquake sequence: A multidisciplinary approach to the geodynamics of the Armorican Massif, westernmost France, *Geophys. J. Int.*, 162(3), 935–950.
- SAMBRIDGE, M. & B. L. N. KENNETT (1986), A novel method of hypocentre location, *Geophys. J. Int.*, 87(2), 679–697.
- SAPIN, M. & C. PRODEHL (1973), Long range profiles in western Europe. I: Crustal structure between the Bretagne and the Central Massif of France, *Ann. Géophys.*, 29(1), 127–145.
- SCHWEITZER, J. (1997), *HYPOSAT – A new routine to locate seismic events*, Scientific Report 1-97/98, NORSAR, Kjeller, Norway.
- STORCHAK, D. A., D. DI GIACOMO, I. BONDÁR, E. R. ENGDAHL, J. HARRIS, W. H. K. LEE, A. VILLASEÑOR & P. BORMANN (2013), Public release of the isc-gem global instrumental earthquake catalogue (1900–2009), *Seismol. Res. Lett.*, 84(5), 810–815.
- TESAURO, M., M. K. KABAN & S. A. P. L. CLOETINGH (2008), EuCRUST-07: A new reference model for the European crust, *Geophys. Res. Lett.*, 35(5), 5.
- WADATI, K. (1933), On the travel time of earthquake waves. Part II, *Geophys. Mag.*, 7, 101–111.
- WALDHAUSER, F. & W. L. ELLSWORTH (2000), A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90(6), 1353–1368.