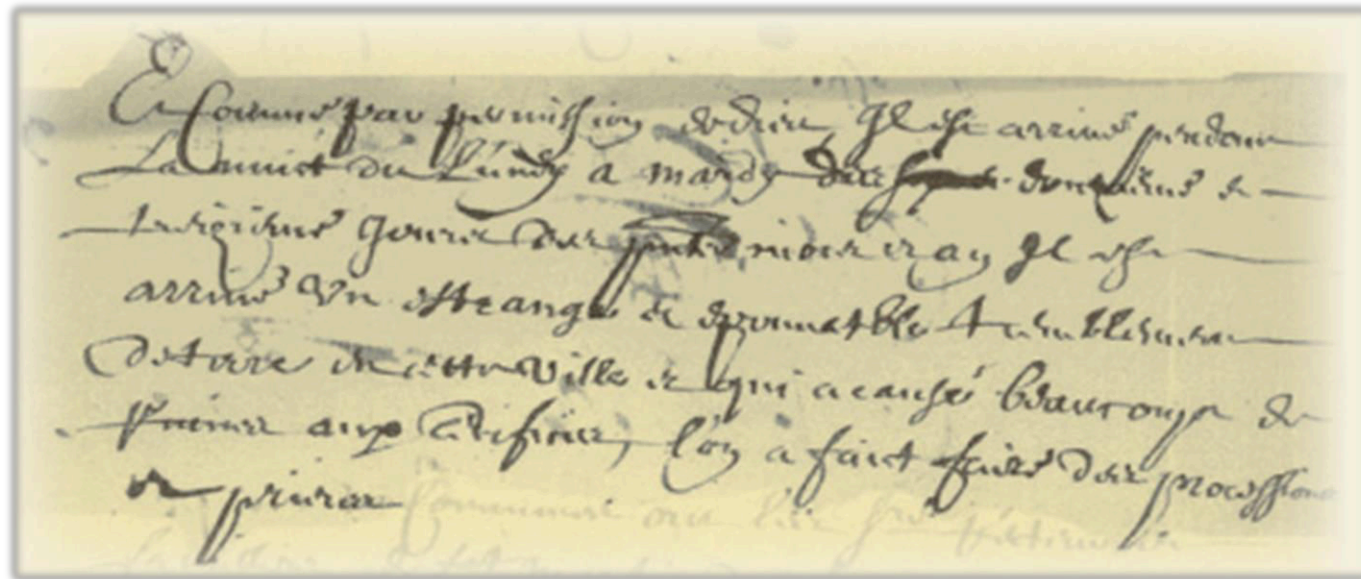


Statistical tools for sparse data: when past testimonies are used to compute earthquakes magnitudes

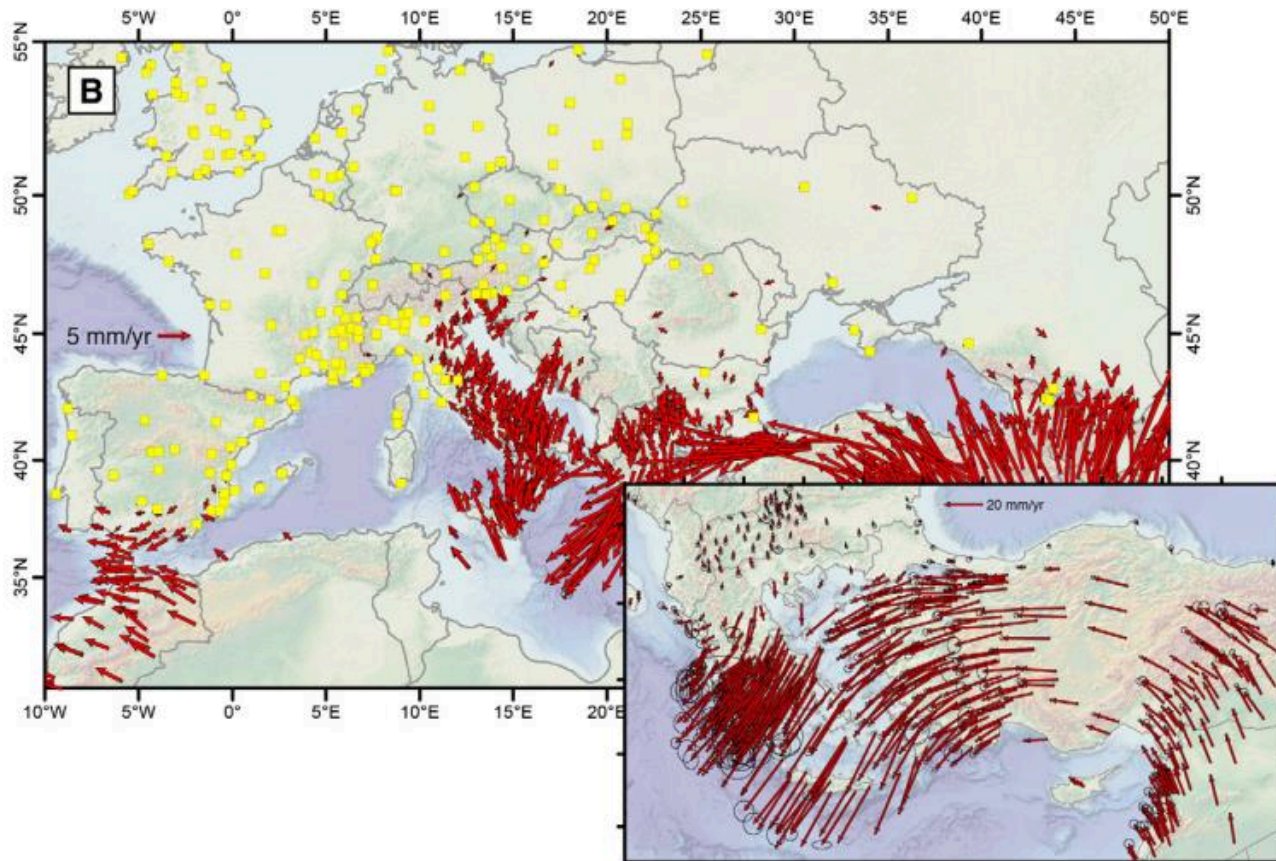
K. Manchuel, P. Traversa, E. Nayman
EDF-DIPNN-DI-TEGG



1- Motivation

Réalisation d'études d'aléa sismique dans les régions à sismicité faible à modérée

- L'Europe de l'Ouest est une zone où les vitesses de déformation sont faibles (~0.5 mm/an – Walpersdorf et al., 2006; Nocquet et al., 2012;)



Nocquet et al., 2012

- ➔ Nécessité d'allonger la période d'observation de la sismicité au-delà des données fournies par les enregistrements sismologiques (i.e. la sismicité instrumentale);
- ➔ Recherche et utilisation des témoignages du passé, au sein des **archives historiques**, pour rendre compte du comportement long terme de la sismicité (i.e. sismicité historique / macrosismicité)

2- Les données de sismicité historique

2.1. Recherche documentaire

- Exemple du séisme de Remiremont (12/05/1682)

Deu au consail du Roy le placet
 presenté à Sa Majesté par les habitans de la ville de Remiremont en Lorraine. Contenant que ladite ville ayant esté agitée d'un trablement de terre le xiii^e de may 1683 [sic = 1682] plusieurs maisons tombèrent et celles qui restèrent sont demeurées entrouvertes en sorte qu'elles ne sont soutenues jusqu'à présent qu'à force d'étais ; ce qui les obligent de supplier sa Majesté de les desgager de toute imposition pendant six ans pour leur donner moyen de restablir ladite ville.

vouloir alléger les impôts : « Veu au conseil d'Etat du Roy le placet, présenté à Sa Majesté par les habitans de la ville de Remiremont en Lorraine. Contenant que ladite ville ayant esté agitée d'un trablement de terre le xiii^e de may 1683 [sic = 1682] : plusieurs maisons tombèrent et celles qui restèrent sont demeurées entrouvertes en sorte qu'elles ne sont soutenues jusqu'à présent qu'à force d'étais ; ce qui les obligent de supplier sa Majesté de les desgager de toute imposition pendant six ans pour leur donner moyen de restablir ladite ville ».

A.D. Haute-Marne, registre paroissial de Saint-Ciergues
 L'an de Nostre Seigneur Mil six cent quatre vingt et deux, la nuit d'entre l'onzieme et douzieme jour de may environ les deux heures et demy du matin dudit jour douzieme, est arrivé un trablemant et maisons trambloit comme des arbre qui que les bastimant et maisons trambloit comme des arbre qui sont poussé du vent, ensemble un grondement qui dura presque la moitié d'un demy care d'heure si bien que cela

Placet des habitants de Remiremont adressé à Sa Majesté (collection archives communales de Remiremont, Vosges)

*à l'église des Dames Les deux Croisiers sont tombés
 ruisseau grand Corps et la Voutte il faut reparer les
 Voutes des D^{es} Croisiers, ce qui costera par estimation
 huit mille livres
 8000
 à murailles sur le portail de la place St Jean est
 renuvertée et la hauteur de quatre toises mesure de
 France Il faut la reparer, ce qui costera par
 estimation
 8000*

« Et comme par permission de Dieu, il est arrivé pendant la nuit du lundy à mardy des douziemes et treiziemes jours des présents mois et an, il est arrivé un estrange et épouvantable tremblement de terre en ceste ville et qui a causé beaucoup de ruines aux édifices ; l'on a fait faire des processions et prières. »

Extrait des délibérations de l'assemblée du Conseil de ville de Luxeuil-Bains, du 14 mai 1682

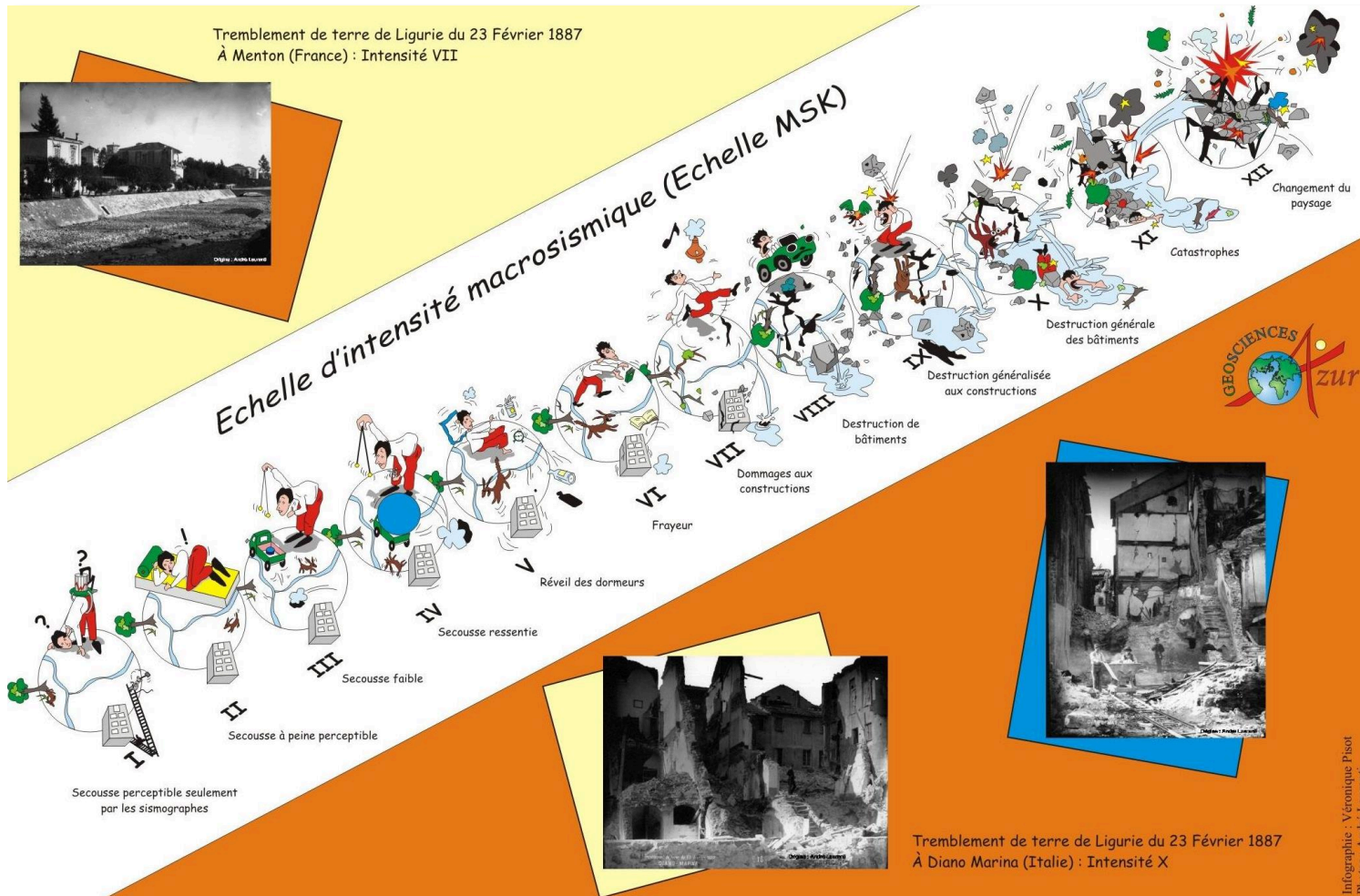
Extrait des délibérations de l'assemblée du Conseil de ville de Luxeuil-Bains, du 14 mai 1682 (collection archives départementales de la Haute-Saône)

*1682. am montag Vor dem Tag
 1682. am montag Vor dem Tag
 1682. am montag Vor dem Tag*

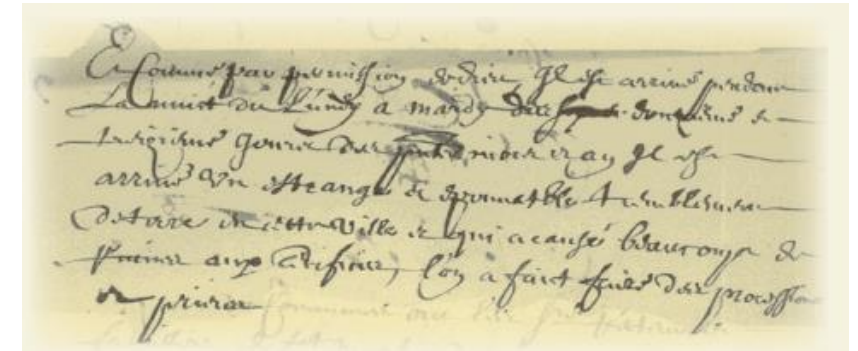
2 - Les données de sismicité historique

2.2. Estimation des intensités

L'intensité traduit, pour un séisme, la perception par les personnes et l'impact sur les biens, en un lieu donné.



Ex: Luxeuil-les-Bains



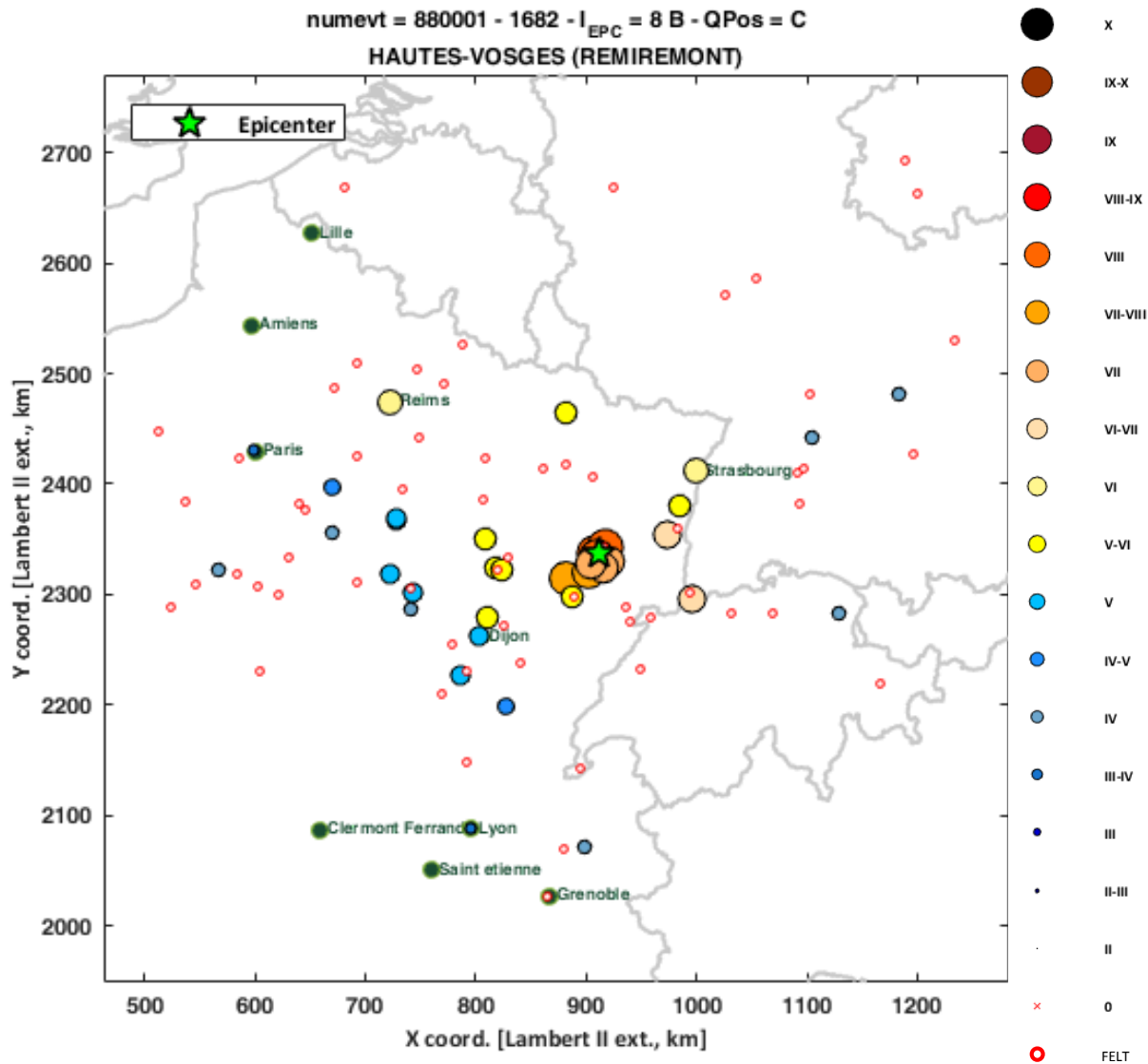
Extrait des délibérations de l'assemblée du Conseil de ville de Luxeuil-les-Bains, du 14 mai 1682 (collection archives départementales de la Haute-Saône)

« Et comme par permission de Dieu, il est arrivé pendant la nuit du lundy à mardy des douziesme et treiziesme jours des présents mois et an, il est arrivé un estrange et épouvantable tremblement de terre en ceste ville et qui a causé beaucoup de ruines aux édifices ; l'on a fait faire des processions et prières. »

$$\rightarrow I_{obs} = VII-VIII \text{ (Q } I_{obs} : C)$$

2 - Les données de sismicité historique

2.3. Champs macrosismique et caractéristiques épacentrales



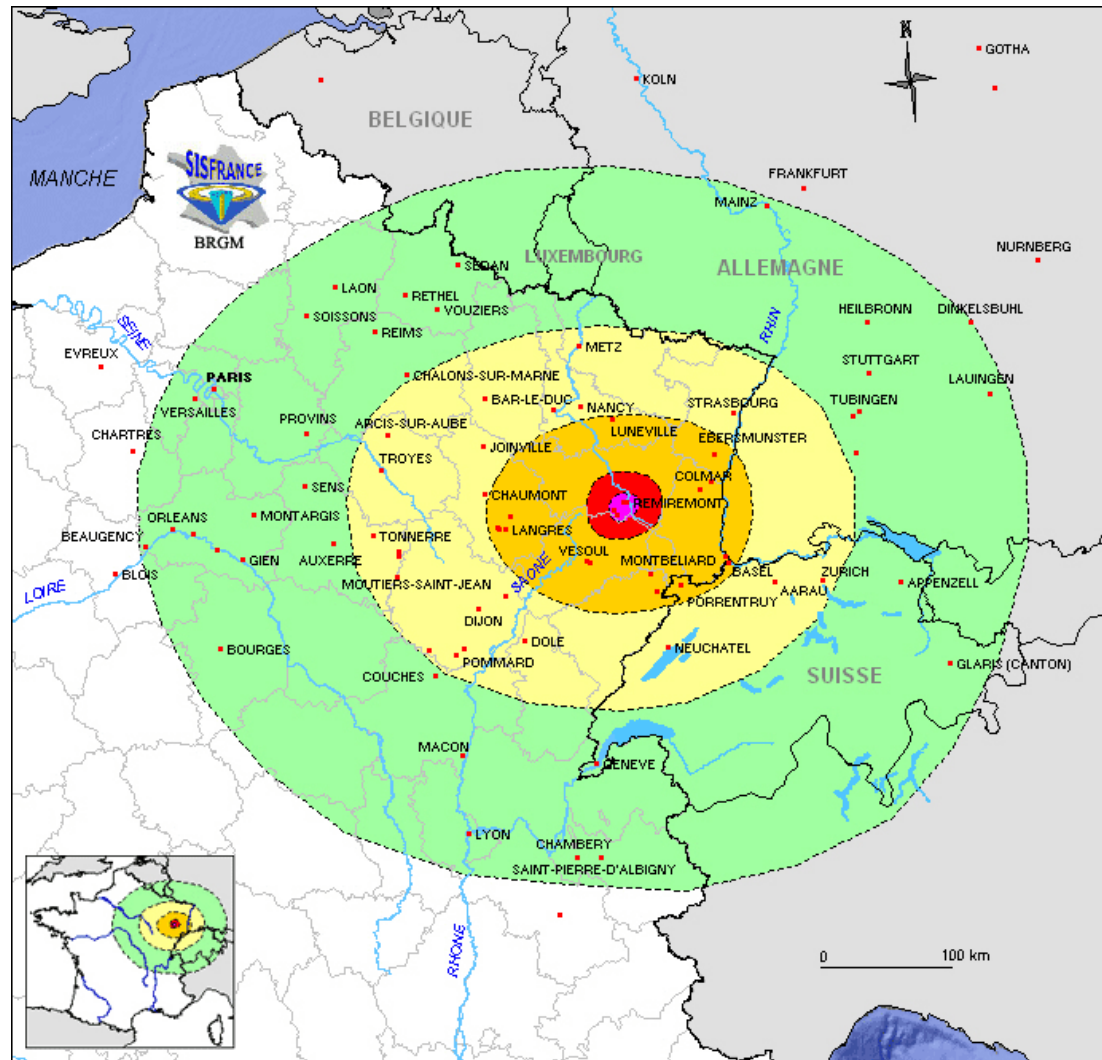
- Le champ macrosismique est l'ensemble des intensités observées pour un séisme;
- L'épicentre est, dans la plupart des cas, localisé au barycentre des intensités observées les plus fortes;
- Chaque paramètre est associé à un indice de qualité.

	QIE	QPOS		QIOBS	QD
A	Sure	Really reliable	Use of isoseists	Sure	Good
B	Pretty sure	Reliable		Pretty sure	Average
C	Uncertain	Uncertain	No use of isoseists	Uncertain	Doubtful
D		Likely			
E	Presumed	Presumed			
I	Isolated	Isolated			
K	Calculated				

Indices de qualité

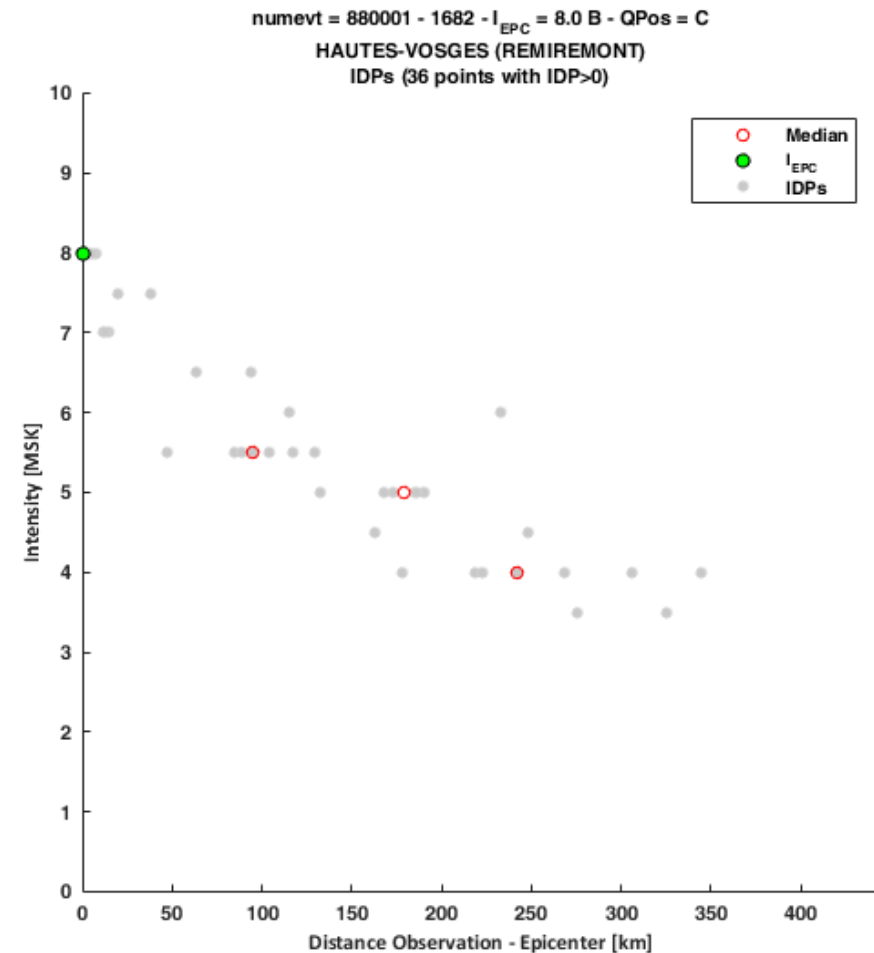
2 - Les données de sismicité historique

2.4. Isoséistes et décroissance des intensités



Isoséistes – Séisme de Remiremont (1682)

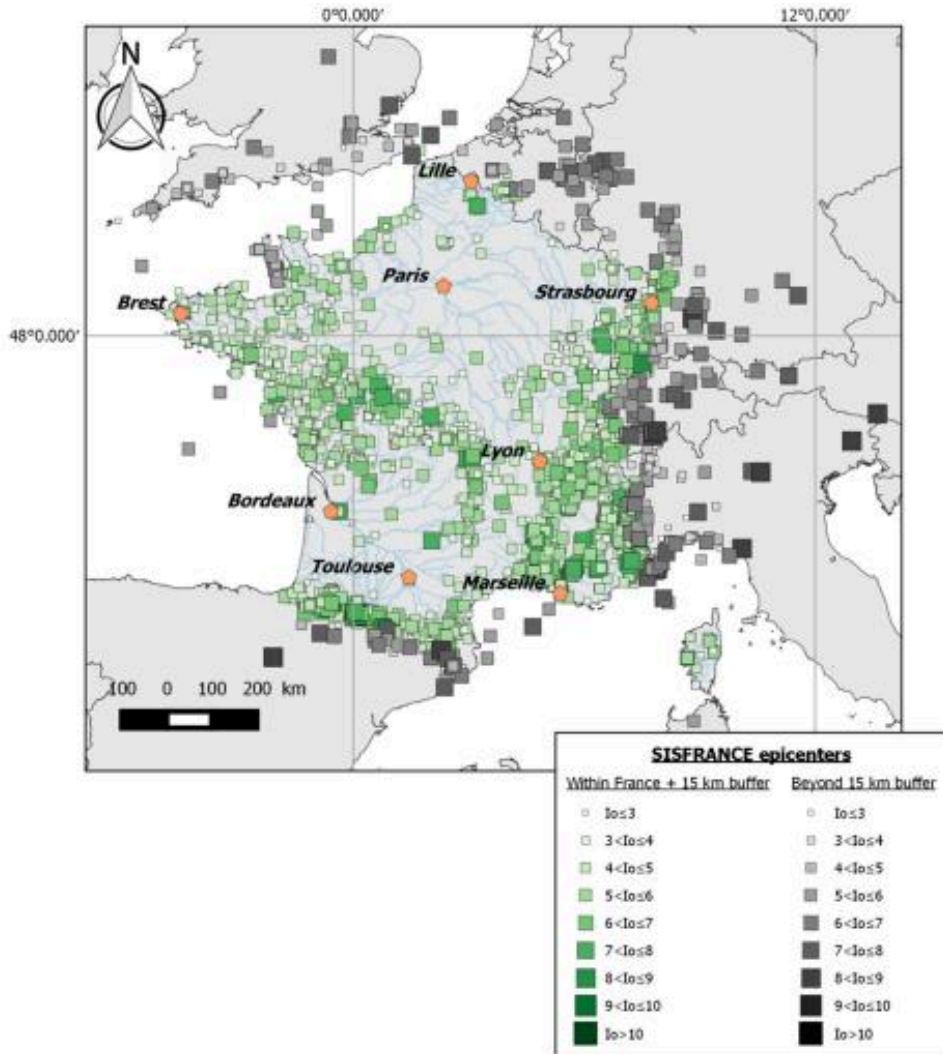
- La décroissance des intensités avec la distance à l'épicentre traduit l'atténuation des ondes sismiques dans la croûte terrestre;



2 - Les données de sismicité historique

2.5. La base de données SISFRANCE

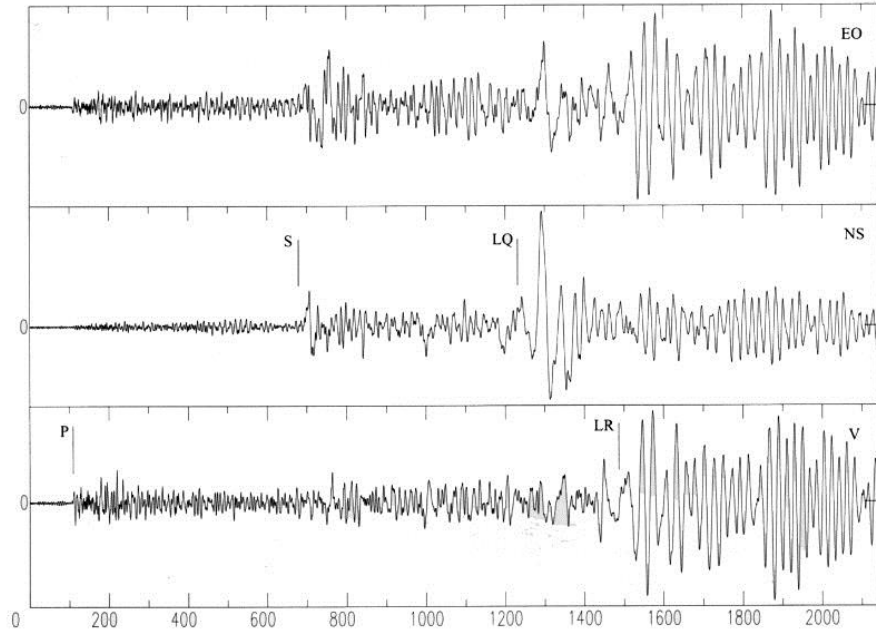
La France possède l'une des meilleures BDD au monde de sismicité historique: **SISFRANCE**



- ~6000 séismes;
- 463 à 2007;
- ~100 000 observations;
- Niveau de connaissance hétérogène en fonction des séismes et des périodes. ~70% des séismes connus uniquement au travers d'une intensité épiscopentrale ou d'informations de ressentis.

3 - De la sismicité historique à l'aléa sismique et à l'ingénierie

Les intensités macrosismiques doivent être « converties » en des indicateurs utiles/adaptés au dimensionnement des structures de génie civil



Sismogrammes

M (magnitude) et H (profondeur)

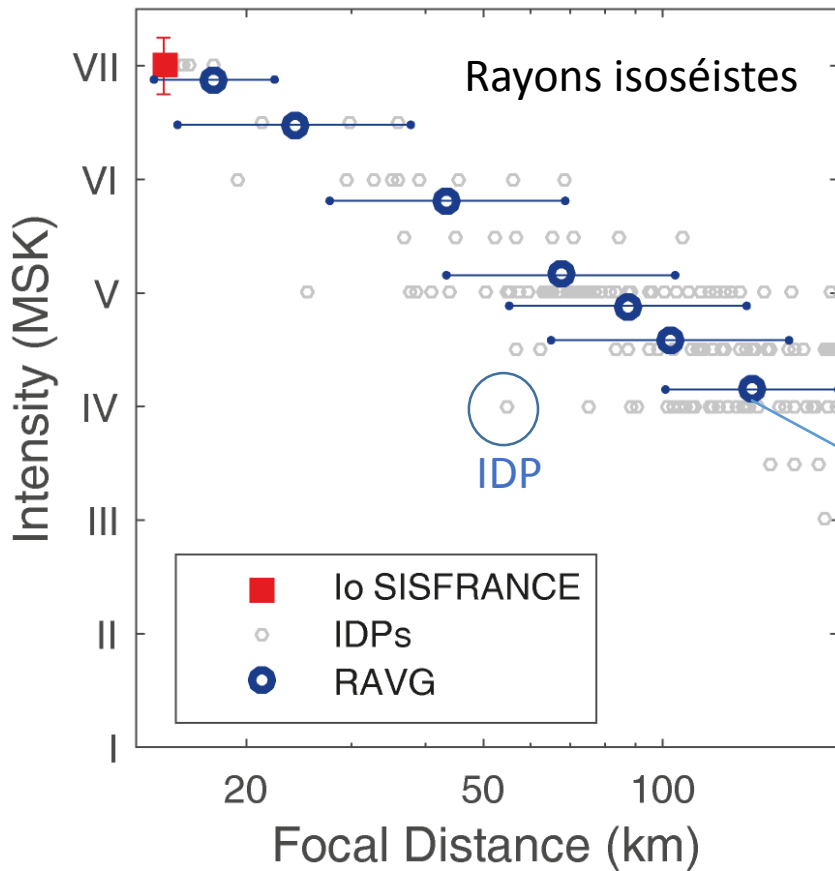


Besoin de définir le séisme de manière précise.
→ en sismologie / aléa sismique on utilise les paramètres: **MAGNITUDE** (grandeur unique liée à la taille et à l'énergie libérée par le séisme) et la localisation du foyer dans les 3 dimensions de l'espace, dont la **PROFONDEUR**

Séismes « modernes » (après ~1960 en France): MAGNITUDE et PROFONDEUR d'un séisme obtenues à partir des enregistrements (SISMOGRAMMES).

4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

Objectif: Passer d'un champ d'intensités macrosismiques à un couple MAGNITUDE – PROFONDEUR



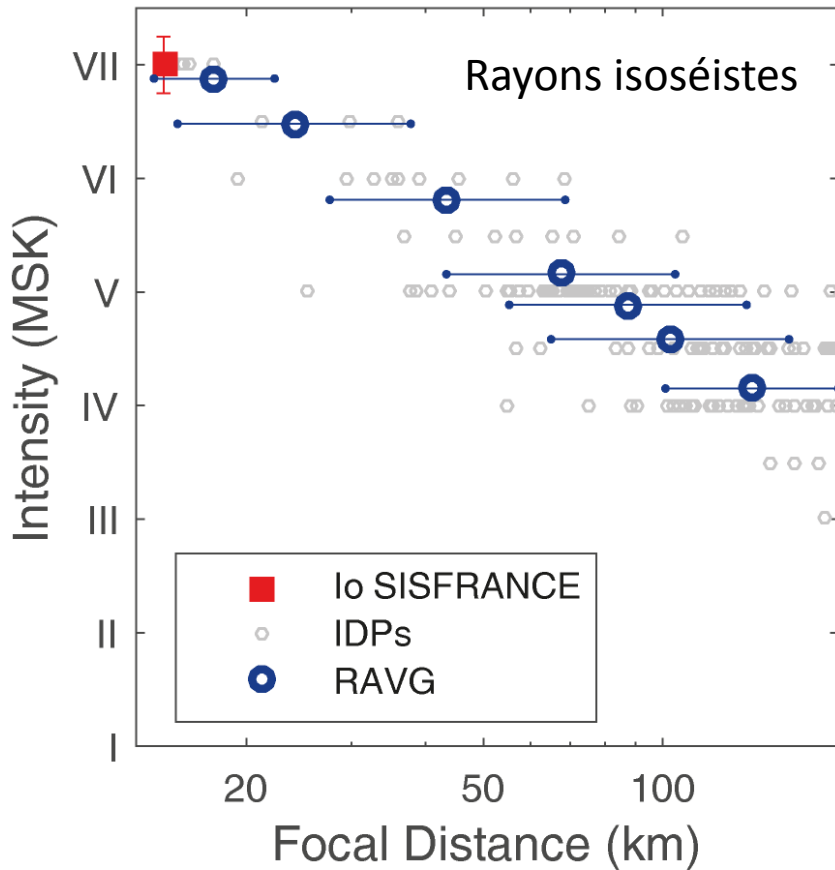
2 étapes:

1. Détermination d'IPE (Intensity Prediction Equations) sur la base d'un jeu de séismes bien connus
2. Inversion des IPE pour déterminer M et H des séismes historiques

Rayon isoséiste →
moyenne, médiane, autre
percentile des IDP dans une
gamme d'intensité

4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

Objectif: Passer d'un champ d'intensités macrosismiques à un couple MAGNITUDE – PROFONDEUR



2 étapes:

1. Détermination d'IPE (Intensity Prediction Equations) sur la base d'un jeu de séismes bien connus
2. Inversion des IPE pour déterminer M et H de séismes historiques

Les propriétés d'atténuation de la croûte terrestre et la décroissance des intensités avec la distance sont utilisés pour déterminer des modèles décrivant l'intensité en fonction de la magnitude et de la distance (IPE).

$$I_j = c_1 + c_2 \cdot M_W + \beta \cdot \log_{10}(R_j) + \gamma_{region} \cdot R_j$$

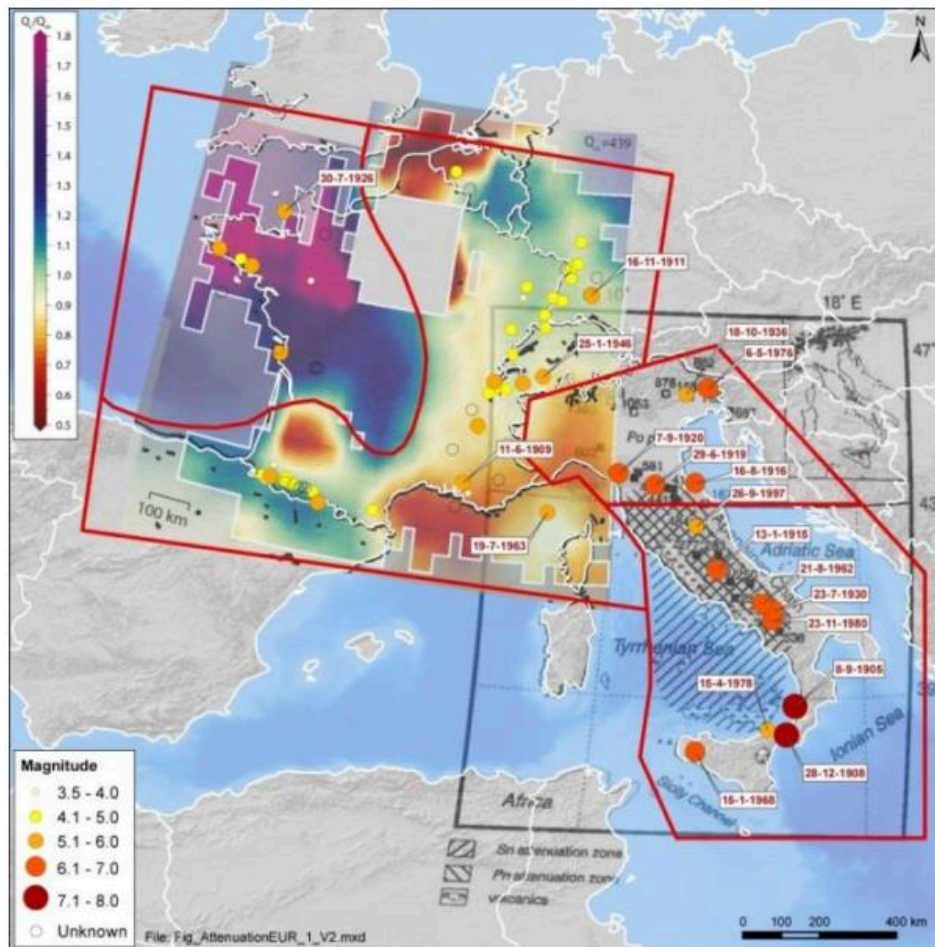
I_j (Intensity level of the j^{th} isoseismal)
 Geometrical spreading
Intrinsic attenuation

R_j (Hypocentral radius of the j^{th} isoseismal)

$$R_j = \sqrt{D_j^2 + H^2}$$

4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

4.1. Détermination d'IPE (Intensity Prediction Equations)



- Implémentation d'un jeu de séismes de calibration (France + Italie), pour lesquels on dispose de:
 - Paramètres M, H connus, déterminés à partir de sismogrammes;
 - Champ d'observations macrosismiques bien distribué
- Découpage en régions d'atténuation similaire
- Utilisation de modèles à effets mixtes pour réaliser la régression

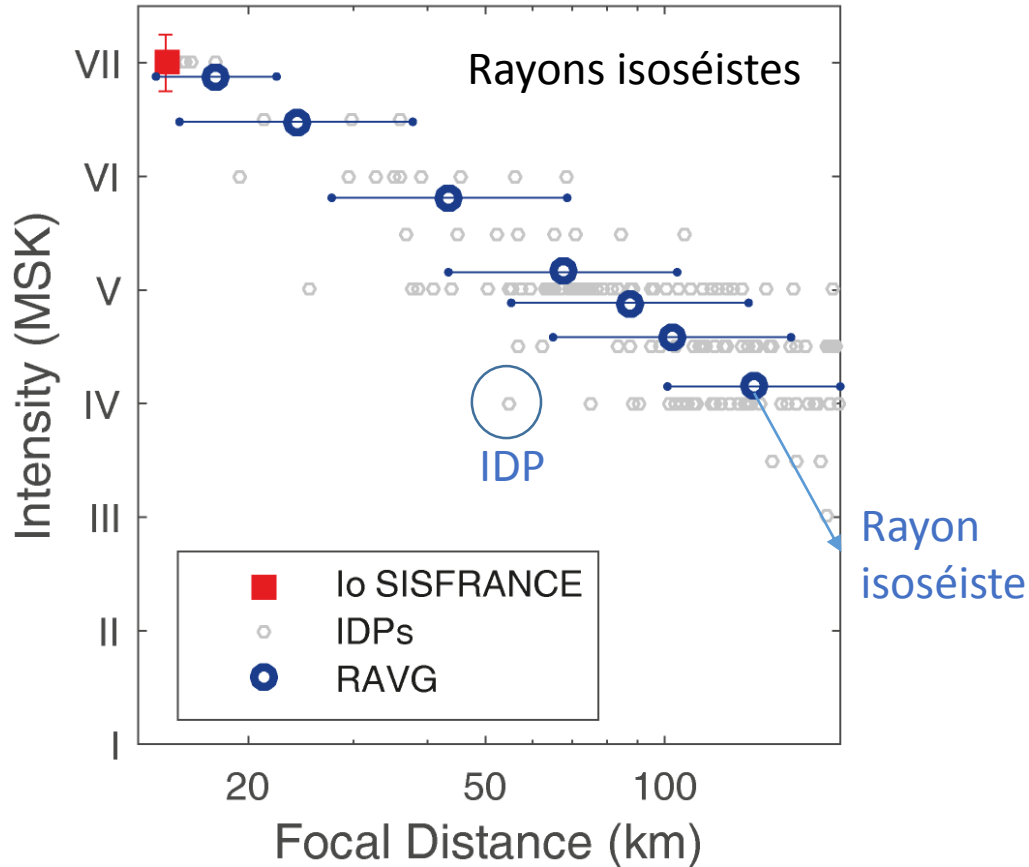
$$I_j = c_1 + c_2 \cdot M_W + \beta \cdot \log_{10}(R_j) + \gamma_{region} \cdot R_j$$

30 séismes en France ($M \leq 5.8$)

11 séismes en Italie ($M \geq 6.0$)

4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

4.3. Prise en compte des incertitudes



- **Incertitudes sur les données macrosismiques:**
 - Chaque point d'observation (IDP) est associé à un indice de qualité de l'observation → quantification et utilisation en tant qu'écart type associé
 - Ecart type autour de chaque rayon isoséiste (défini comme la moyenne, la médiane ou autre percentile des IDP dans une gamme d'intensité)
- **Incertitude sur les données instrumentales** (paramètres M et H déterminés à partir des sismogrammes)



Ecart type associé à l'IPE

- **Incertitudes épistémiques** issues de:
 - Sélection du jeu de séismes de calibration
 - Manière de définir le rayon isoséiste
 - Découpage régional
 - Manière de considérer l'intensité épicentrale dans la régression

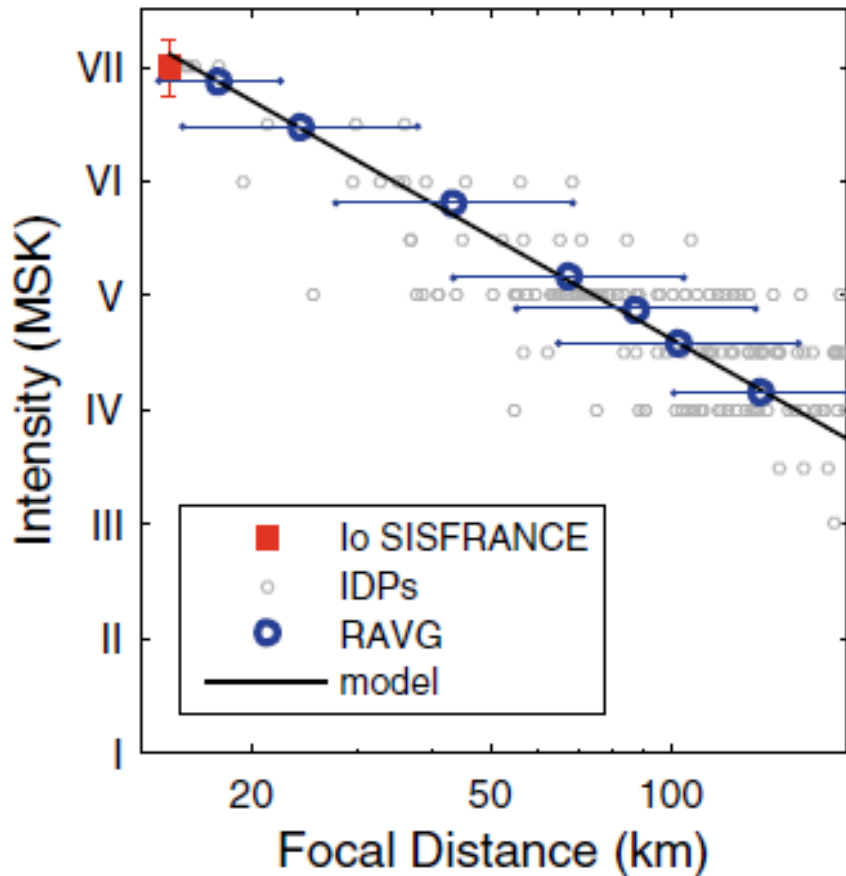


IPE alternatives

4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

4.2. Méthodologie d'inversion

RAVG - Mw = 5.4, H = 14.5 km



$$I_j = c_1 + c_2 \cdot M_W + \beta \cdot \log_{10}(R_j) + \gamma_{region} \cdot R_j$$

$$d = g(m)$$

$$R_j = \sqrt{D_j^2 + H^2}$$

Utilisation d'une approche par maximum de vraisemblance (moindres carrés, Tarantola, 2005)

- Solution conjointe de M et H
- Procédure itérative Quasi-Newton afin de minimiser la fonction misfit (problème faiblement non-linéaire)
- Les incertitudes associées aux paramètres en sortie sont issus de la matrice de covariance à postériori.

$$m_{n+1} = m_n - (G_n^t C_D^{-1} G_n + C_M^{-1})^{-1} (G_n^t C_D^{-1} (d_n - d_{obs}) + C_M^{-1} (m_n - m_{prior}))$$

$$d_n = g(m_n)$$

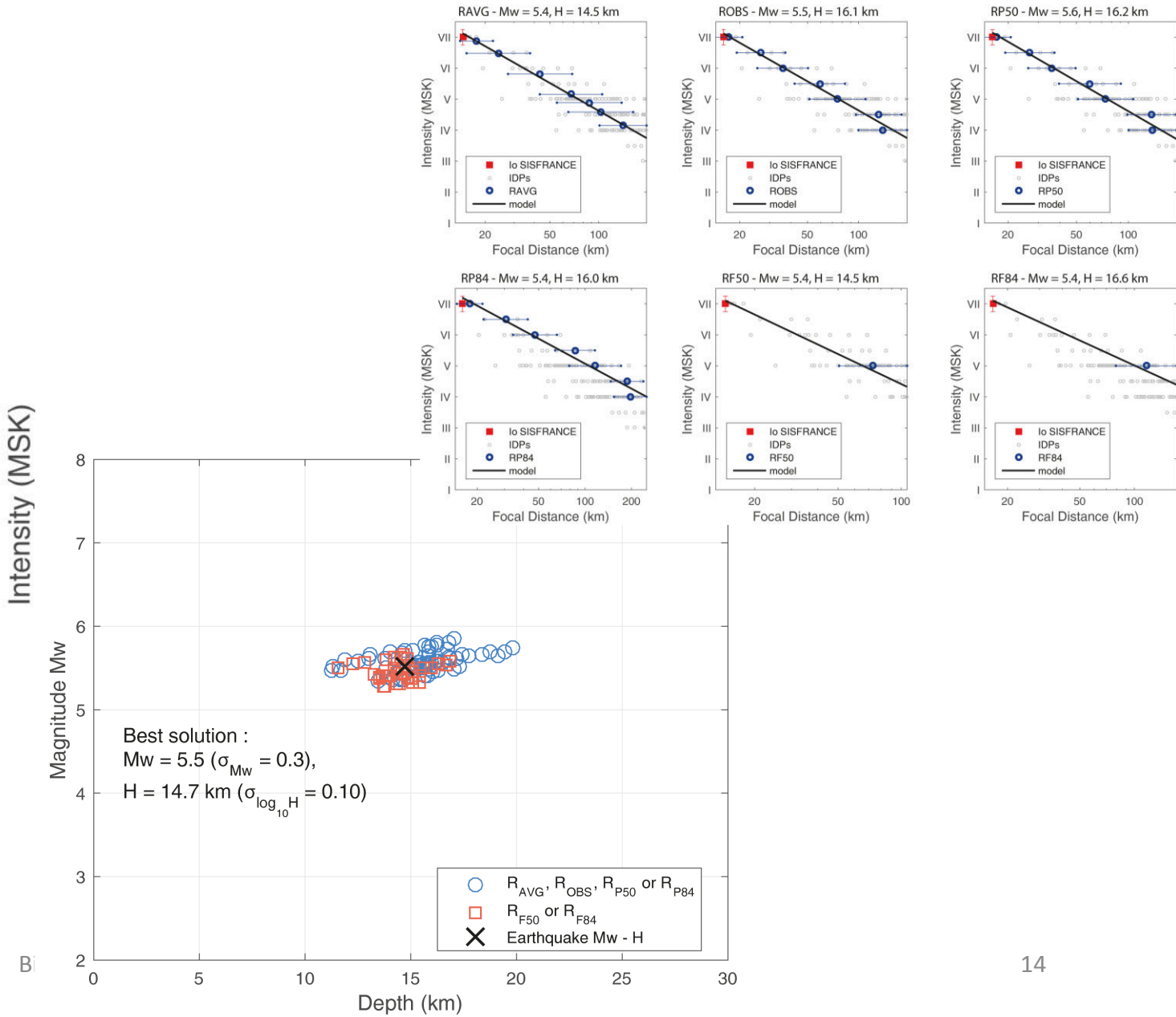
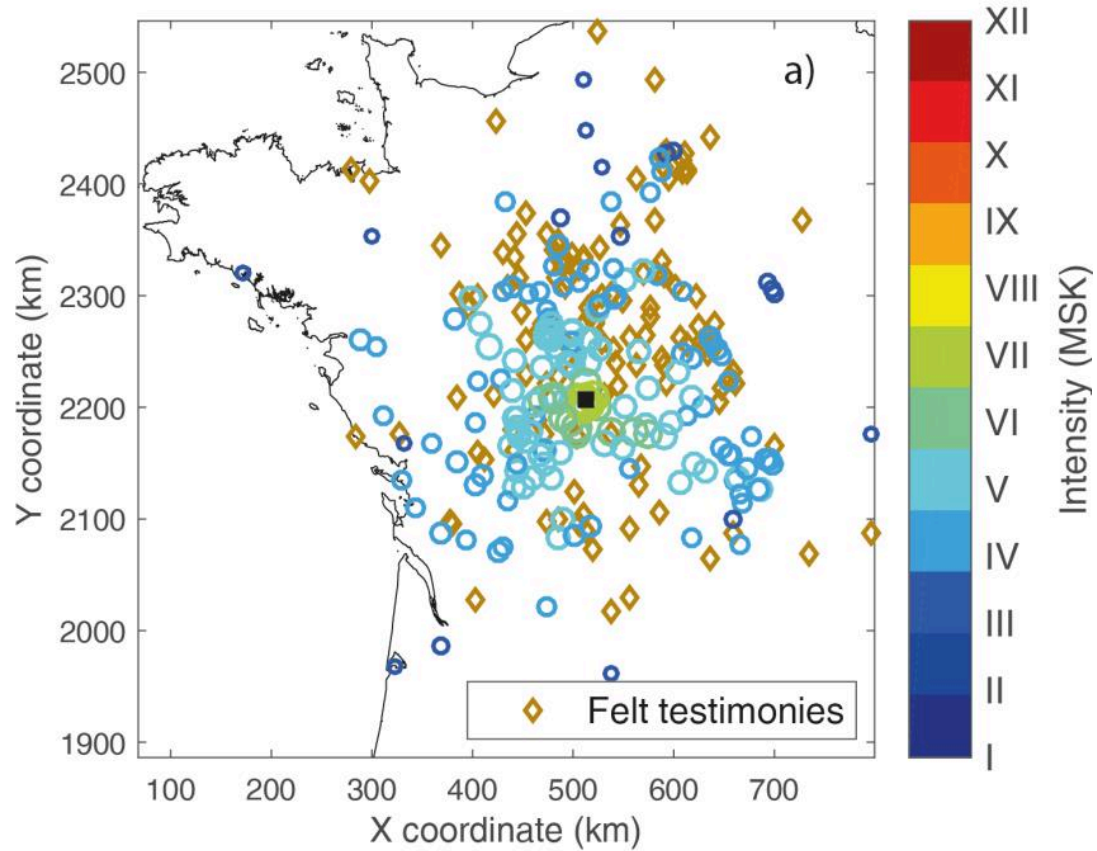
$$2S(m) = \|g(m) - d_{obs}\|_D^2 + \|m - m_{prior}\|_M^2 = (g(m) - d_{obs})^t C_D^{-1} (g(m) - d_{obs}) + (m - m_{prior})^t C_M^{-1} (m - m_{prior})$$

Misfit function

4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

4.3. Exemple

Brenne (Azay Le Ferron) 1866, September 14
Earthquake ($I_0 = VII$ MSK)

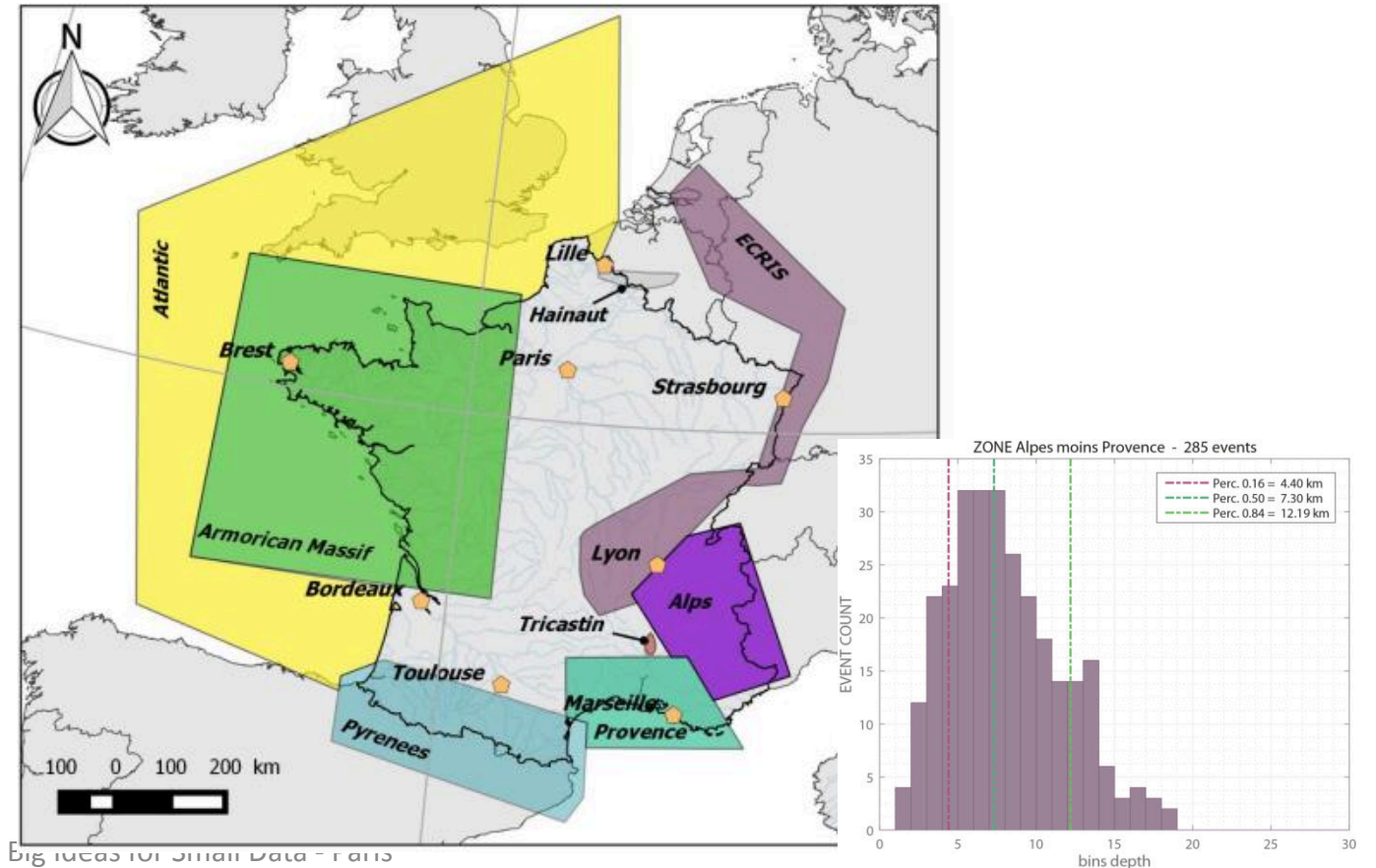
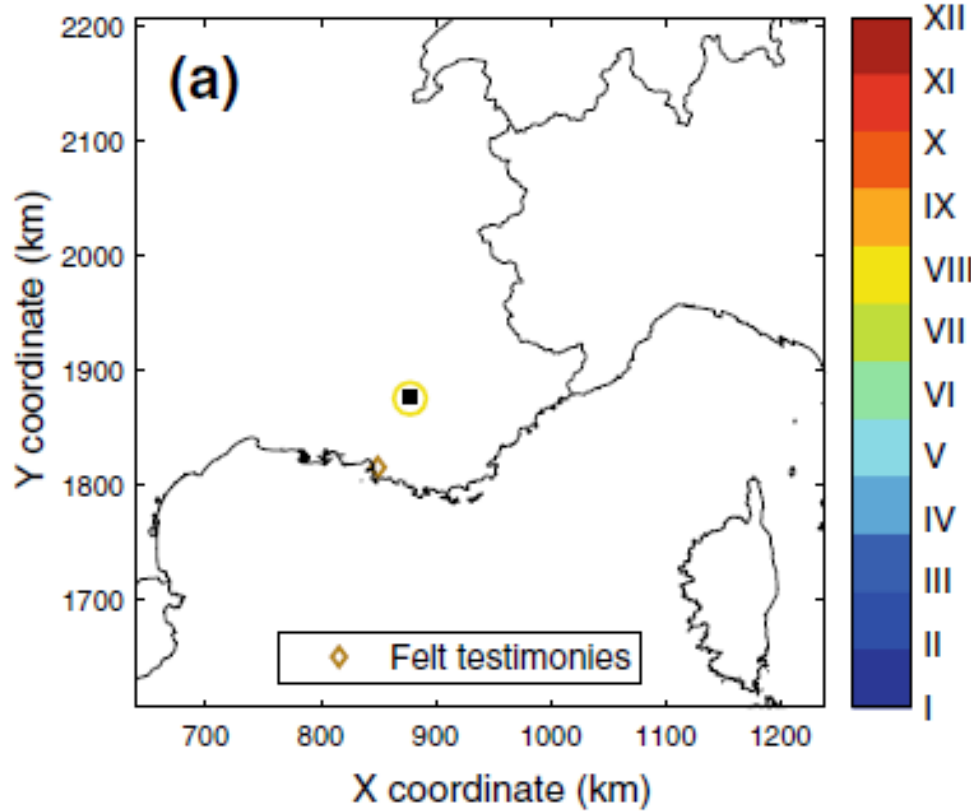


4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

4.4. Séismes mal connus

Pas de champ macrosismique disponible, seulement une ou très peu d'observations (pas forcément quantifiables) disponibles

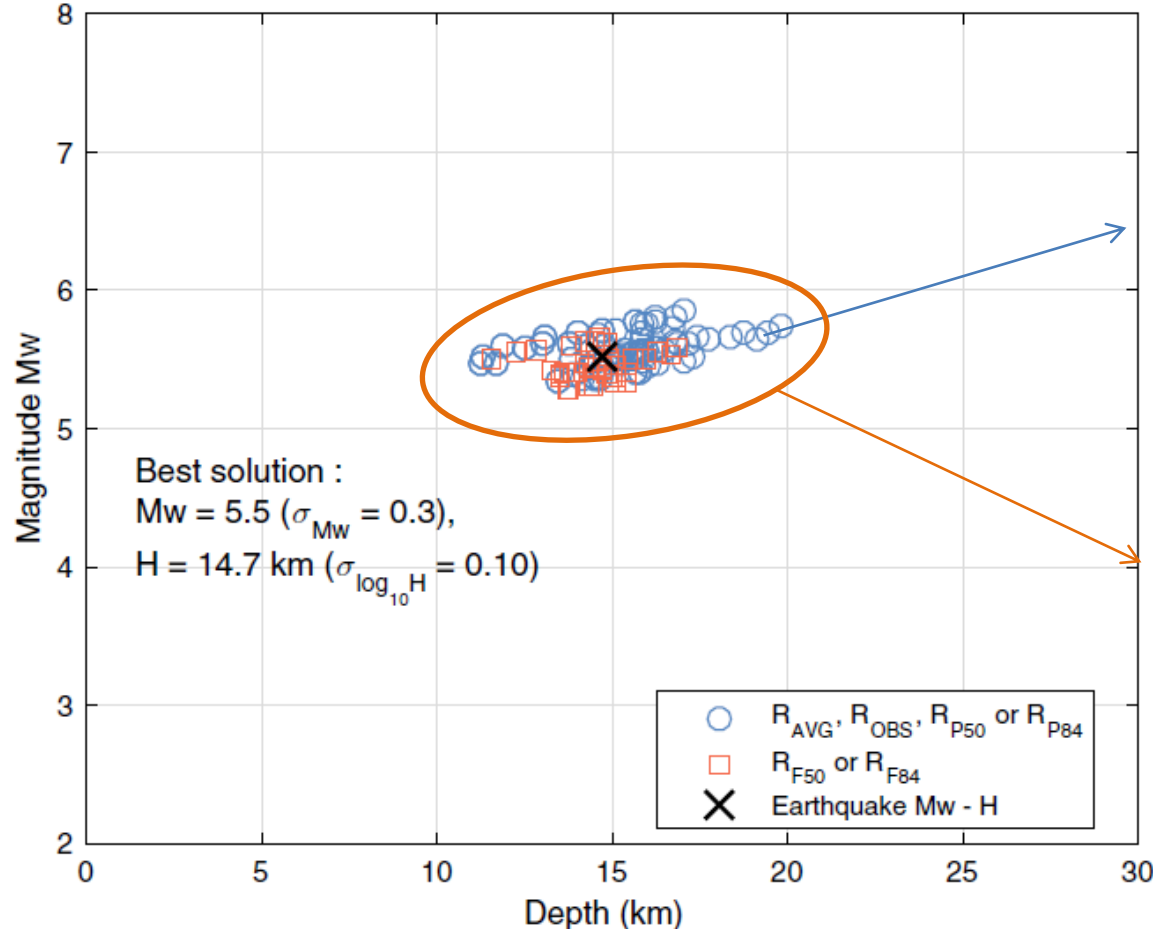
→ Profondeur fixée à priori et magnitude calculée en utilisant les IPE



4 - Calcul des paramètres M et H d'un séisme historique

4.5. Incertitudes globales

- Propagation et exploration des incertitudes associées aux données macrosismiques et à la sélection des IPE:



Unc_{Mwi}, Unc_{Hi} associated to individual M_{wi} and H_i solutions from WLSQ inversion

COMBINED WITH

Results dispersion → std(M_{wi}) and std(H_i)



σ_{M_w} and $\sigma_{\log_{10}(H)}$

- For Io and felt strategies : Unc_{Mi} from partial derivatives method; Unc_H from distribution of regional depths

5 - Conclusions

Détermination d'un catalogue homogène pour la France pour la période historique, avec incertitudes associées.

~ 6000 séismes sur la période 463 – 2007.

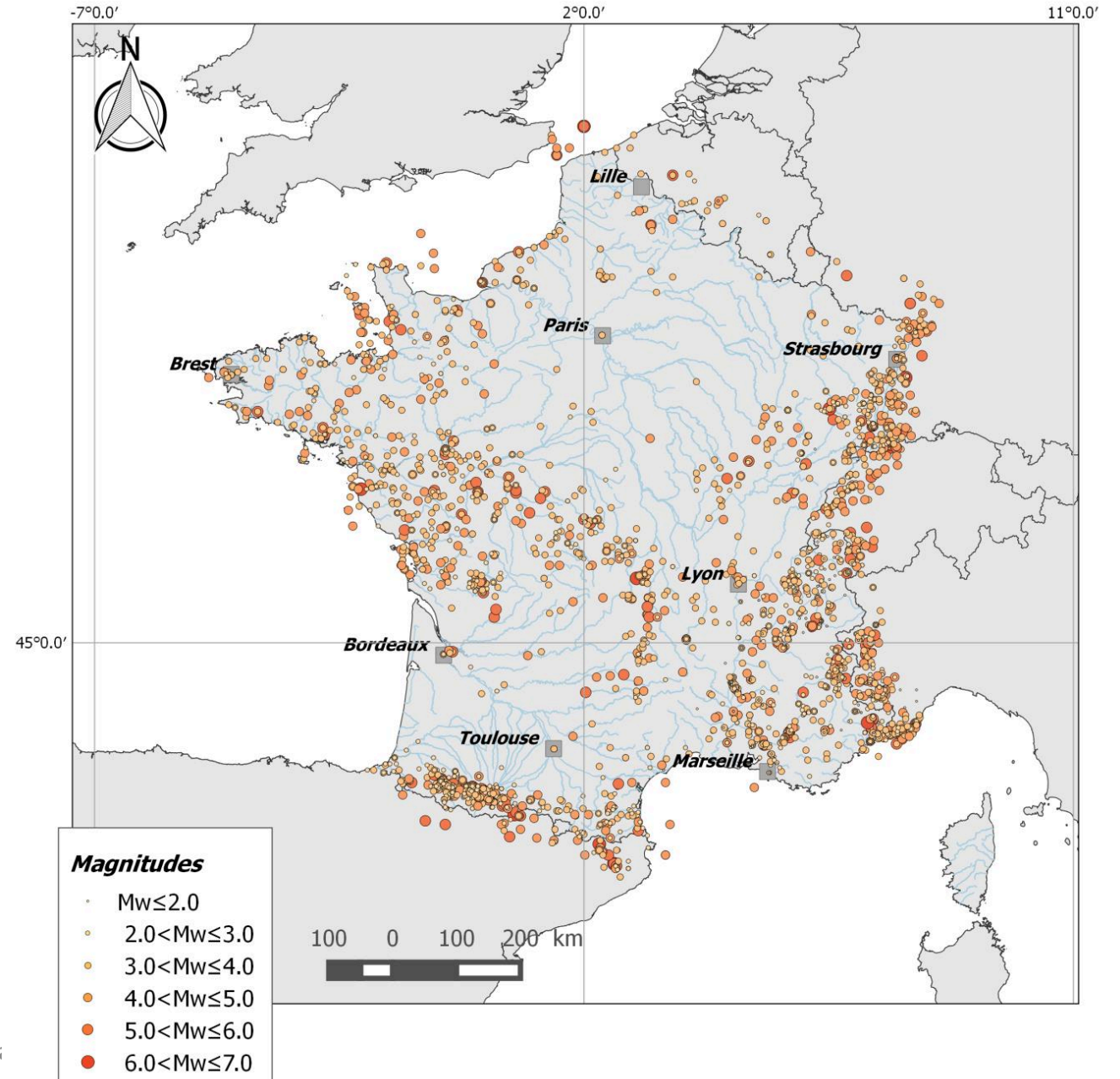
~ 30% des séismes: analyse complète à partir d'un champ macrosismique → inversion jointe des paramètres M & H

~ 70% des séismes avec profondeur fixée à priori et M calculée en utilisant les équations déterminées.

Baumont et al. (2018)

Traversa et al. (2018)

Manchuel et al. (2018)



6 – Perspectives – Travail en cours

- Elargissement du jeu de séismes de calibration
 - Meilleure couverture entre un set à magnitudes modérées et un set à magnitude fortes
 - Meilleure couverture des régions à atténuation faible (données slovènes, anglaises...)
- Amélioration du découpage régional en fonction de l'atténuation (data-driven cluster analysis)
- Amélioration de la solution finale en adoptant une pondération des solutions alternatives basée sur le résidu médian des solutions
- Extension des modèles en ajoutant un niveau hiérarchique constitué de variables latentes définies comme des intensités macrosismiques à valeurs continues (les intensités observées seraient le fruit d'un processus de discrétisation à définir) → formulation alternative au rayon isoséiste pour tenir compte du caractère discret des observations avec l'avantage de conserver le nombre d'observations de départ.

MERCI !!!