

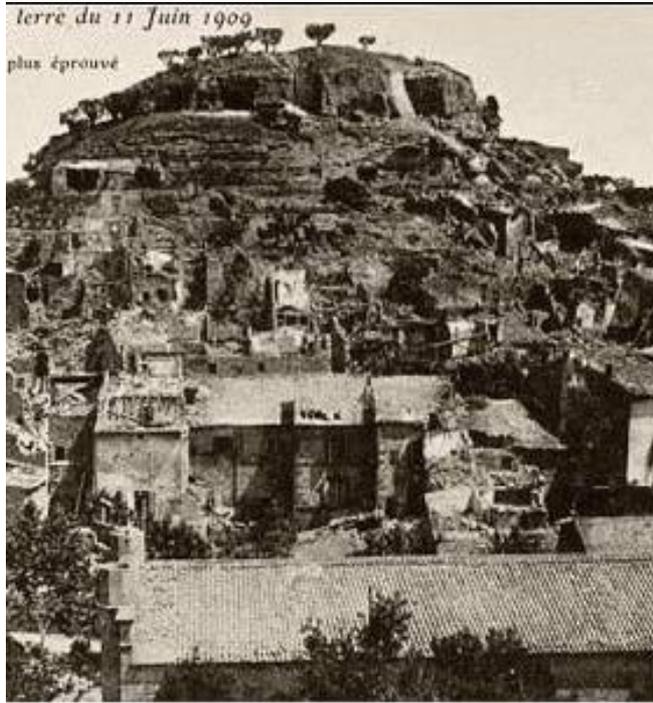


LES SÉISMES & L'ÉVALUATION DE L'ALÉA SISMIQUE POUR CIGÉO

Frédéric Ego, Jean-Charles Robinet
& Stéphan Schumacher

Direction Scientifique et Technique de l'Andra

Clis - Réunion du mardi 16 mai 2023 - Bure (55)



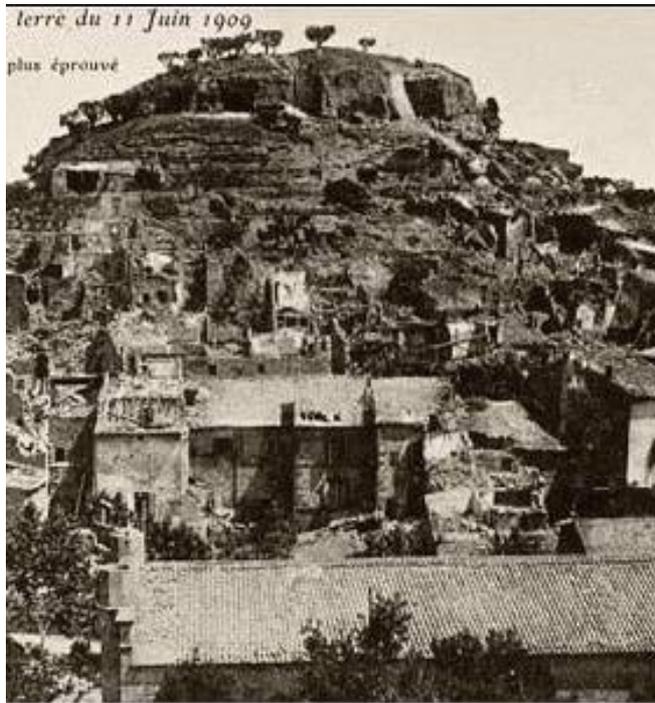
Sommaire

Qu'est-ce qu'un tremblement de terre ?
Quels sont ses effets ?

Le contexte géodynamique, sismotectonique
et géologique du Bassin parisien oriental

Les outils Andra : ex. RES & ACC

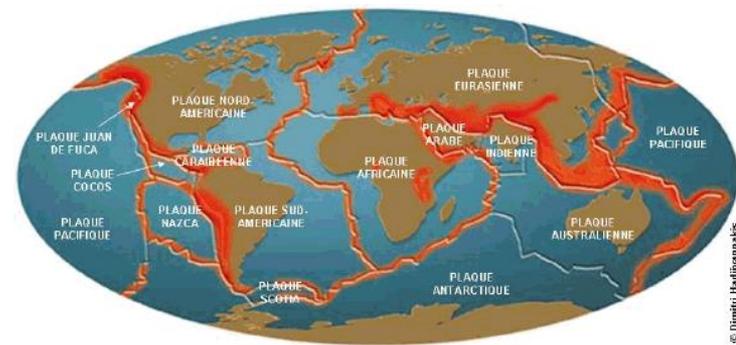
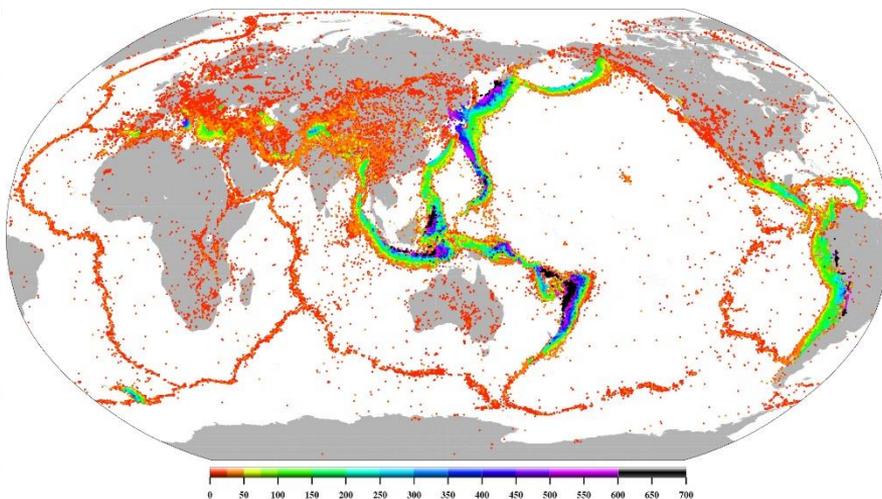
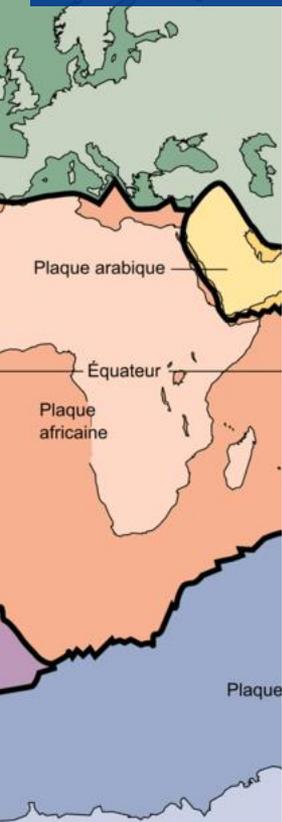
L'évaluation de l'aléa sismique et la
démarche Andra



Qu'est-ce qu'un tremblement de terre ? Quels sont ses effets ?

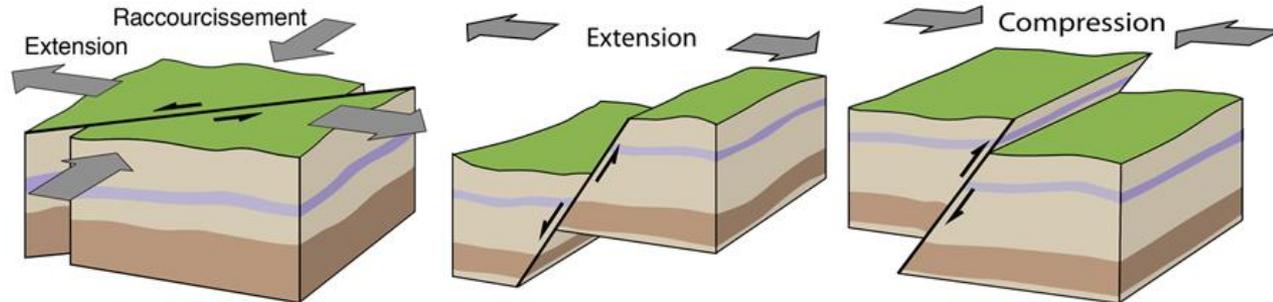
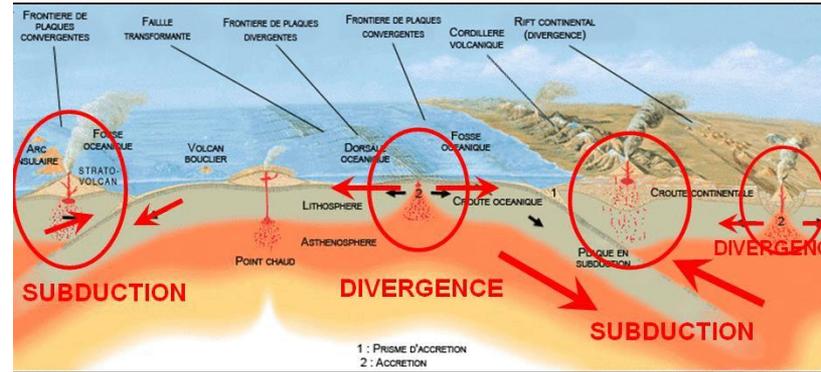
Qu'est-ce qu'un séisme et où se produisent-ils?

Un séisme est une secousse du sol résultant de la rupture brutale de deux blocs de l'écorce terrestre séparés par une faille, associée avec la libération brusque d'énergie accumulée par les contraintes tectoniques. Les séismes se produisent essentiellement dans les zones où les plaques tectoniques en mouvement sont en contact et frottent les unes contre les autres.

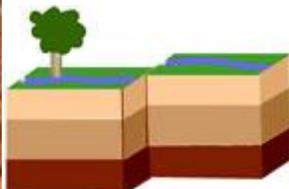


Les différentes limites de plaques et failles

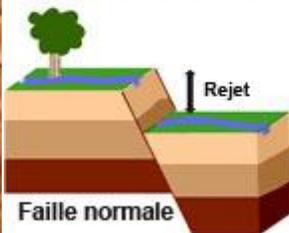
Un séisme ou tremblement de terre se produit à la frontières des limites de plaques et/ou à l'intérieur des plaques tectoniques sur des failles



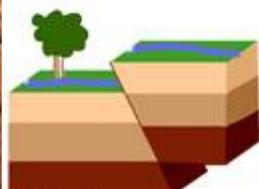
Les différents types de failles sur le terrain



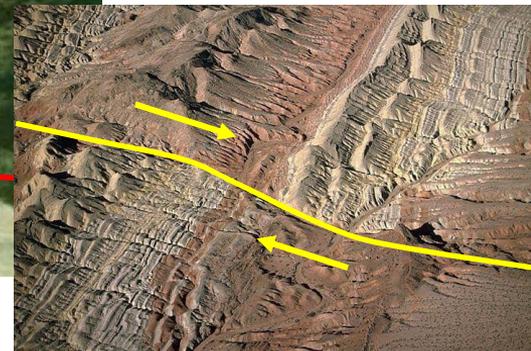
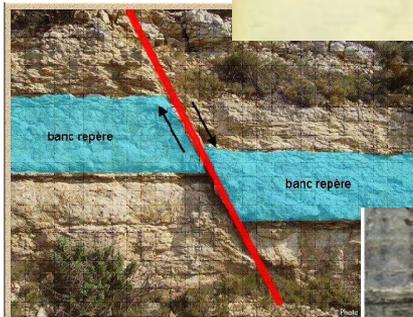
Faille décrochante



Faille normale



Faille inverse

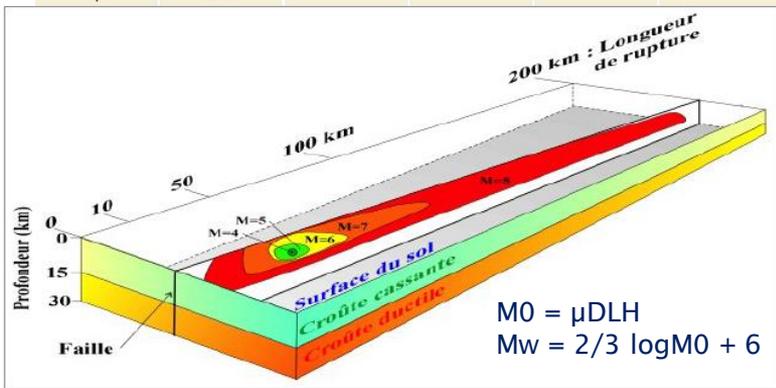


Amplification par la topographie

Magnitude et intensité

Magnitude : mesure de l'énergie libérée par un séisme au point de rupture, relative à la taille de la rupture sur la faille (ne change pas quand on s'éloigne de l'épicentre)

Magnitude	Énergie libérée	Durée de la rupture	Valeur moyenne du rejet	Longueur moyenne du coulissage	Nbre de séismes par an dans le monde (ordre de grandeur)
9	$E \times 30^9$	250 s	8 m	800 km	1 tous les 10 ans
8	$E \times 30^8$	85 s	5 m	250 km	1
7	$E \times 30^7$	15 s	1 m	50 km	10
6	$E \times 30^6$	3 s	20 cm	10 km	100
5	$E \times 30^5$	1 s	5 cm	3 km	1 000
4	E	0,3 s	2 cm	1 km	10 000
3	$E/30$				> 100 000
2	$E/30^2$				
1	$E/30^3$				



Intensité : estimée à partir des effets ressentis ou observés en surface en un lieu donné. Elle dépend de la distance à l'épicentre

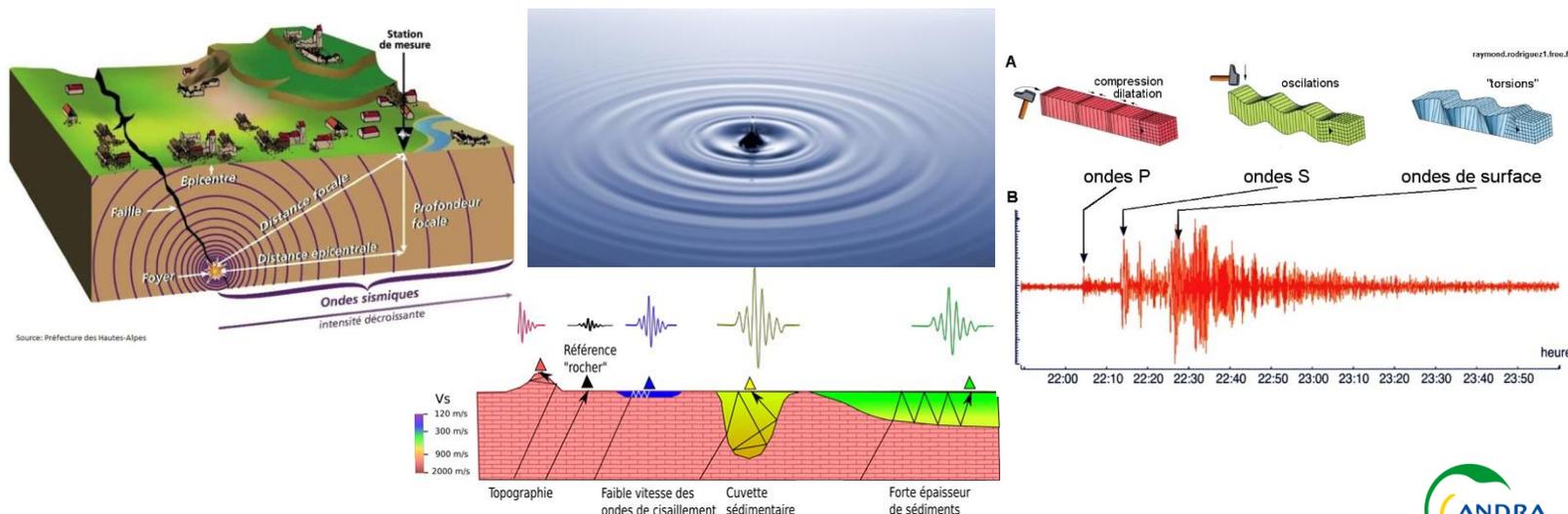
EMS-98 Intensité	Ressenti	Effets	Magnitude (Approximation)	Dégâts des bâtiments (Maçonnerie)
I	Non ressenti	Non ressenti	2	
II-III	Faible	Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une vibration ou un léger tremblement.		
IV	Léger	Ressenti à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes, à l'extérieur par très peu. Quelques personnes sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent.	3	
V	Moderé	Ressenti à l'intérieur des habitations par la plupart, à l'extérieur par quelques personnes. De nombreux dormeurs se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans leur ensemble. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.	4	
VI	Fort	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Chute d'objets. De nombreuses maisons subissent des dégâts non structuraux comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre.	5	
VII	Très fort	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étagères. De nombreuses maisons ordinaires bien construites subissent des dégâts modérés: petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées; des bâtiments plus anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la défaillance des cloisons de remplissage.		
VIII	Violent	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des défaillances sérieuses des murs, tandis que des structures anciennes peu solides peuvent s'écrouler.	6	
IX	Très violent	Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écroulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants: défaillances sérieuses des murs et effondrement structural partiel.	7	
X+	Extrême	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent, même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits.		

Amplification
par la topographie

Les effets d'un tremblement de terre (1/2)

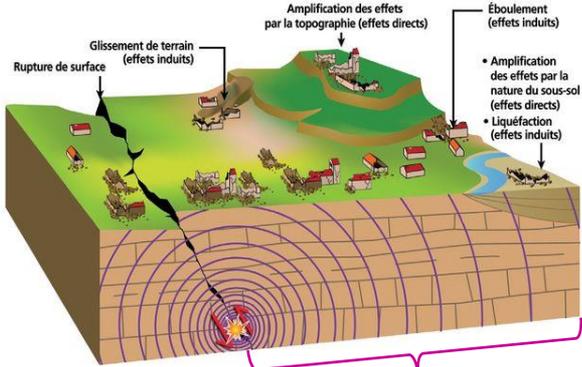
Lors d'un séisme, une fracturation des roches se produit en profondeur le long d'un plan de faille avec une libération soudaine de l'énergie. Il se produit une propagation d'ondes sismiques dans les trois dimensions.

=> **Le sol tremble en raison de l'arrivée en surface de vibrations ou ondes sismiques, provoquées par la rupture de la faille en profondeur.**

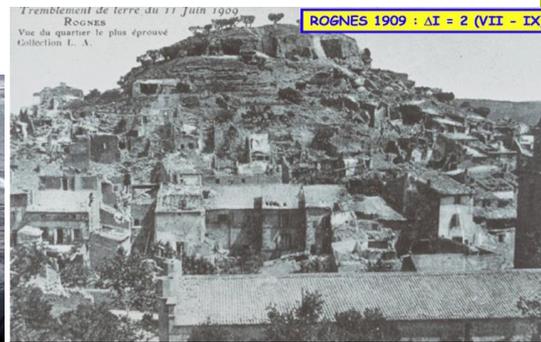


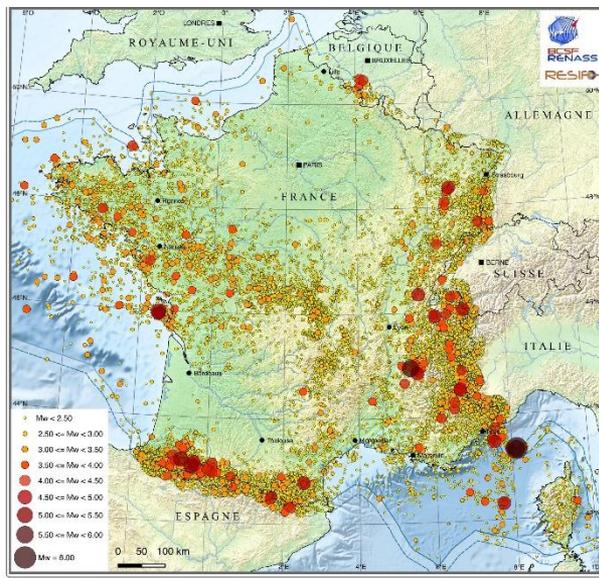
Amplificatio
par la topograph

Les effets d'un tremblement de terre (2/2)



Ondes sismiques
Intensité décroissante





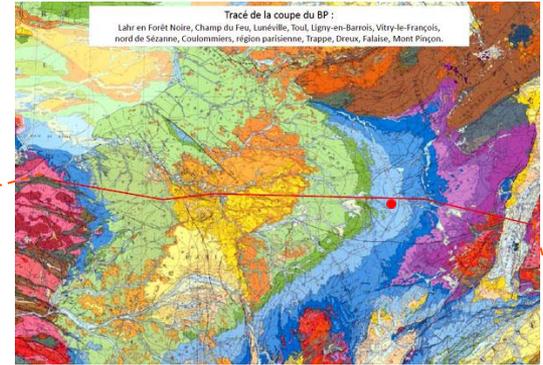
Le contexte géodynamique, sismotectonique et géologique du Bassin Parisien oriental

Le Bassin parisien

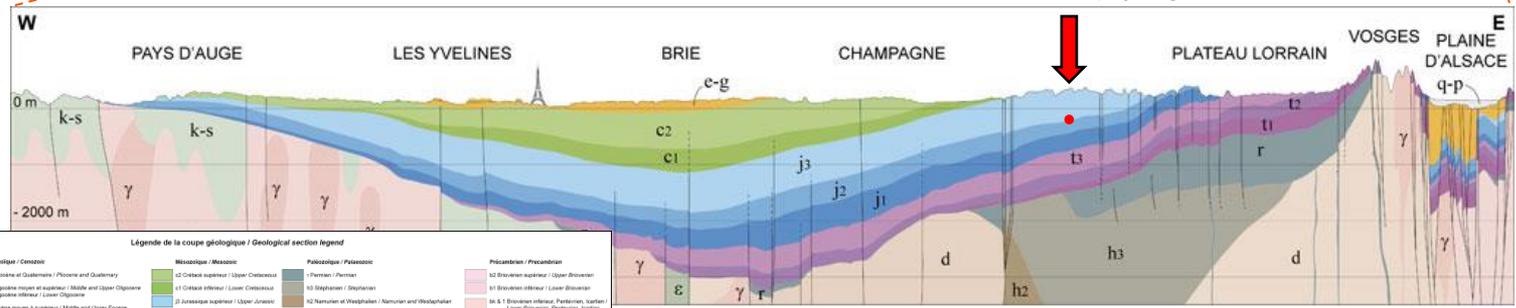
Un cadre géologique simple

Quelques points clés :

- Bassin sédimentaire intracontinental, avec un pendage des bordure vers le centre (1-3°)
- Subsidence tectonique/thermique et flexuration lithosphérique avec sédimentation progressive depuis 250 Ma
- Pas de faille majeure qui compliquerait la structure du bassin
- Couverture sédimentaire mésozoïque de plus de 3000 m
- Les environnements de dépôts sont principalement contrôlés par les variations eustatiques



Localisation du projet Cigéo



Légende de la coupe géologique / Geological section legend

Cénozoïque / Cenozoic	Mésozoïque / Mesozoic	Paléozoïque / Palaeozoic	Précambrien / Precambrian
q4 Pléistocène et Quaternaire / Pleistocene and Quaternary	k2 Crétacé supérieur / Upper Cretaceous	f Permien / Permian	h1 Bréviaire inférieur / Lower Breconian
q3 Oligocène moyen et supérieur / Middle and Upper Oligocene	k1 Crétacé inférieur / Lower Cretaceous	s3 Stéphanien / Stephanian	h2 Bréviaire supérieur / Upper Breconian
q2 Oligocène moyen et inférieur / Middle and Lower Oligocene	j3 Jurassique supérieur / Upper Jurassic	s2 Karbonifère et Westphalien / Carboniferous and Westphalian	h3 Bréviaire moyen et supérieur / Middle and Upper Breconian
q1 Paléocène et Eocène inférieur / Palaeocene and Lower Eocene	j2 Jurassique moyen / Middle Jurassic	s1 Karbonifère et Carbonifère inférieur / Middle and Upper Carboniferous	h4 Bréviaire inférieur / Lower Breconian
	j1 Jurassique inférieur / Lower Jurassic	s0 Silurien / Silurian	
	t3 Trias supérieur / Upper Triassic	o Ordovicien / Ordovician	
	t2 Trias moyen / Middle Triassic	o1 Ordovicien inférieur / Lower Ordovician	
	t1 Trias inférieur / Lower Triassic	c Carbonifère / Carboniferous	

DISTEC/DRG/GEO/23-0013

Ce document est la propriété de l'Andra. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

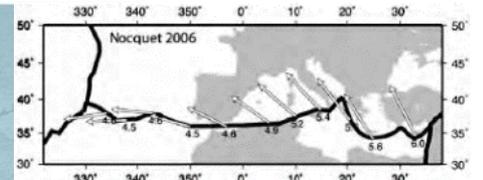
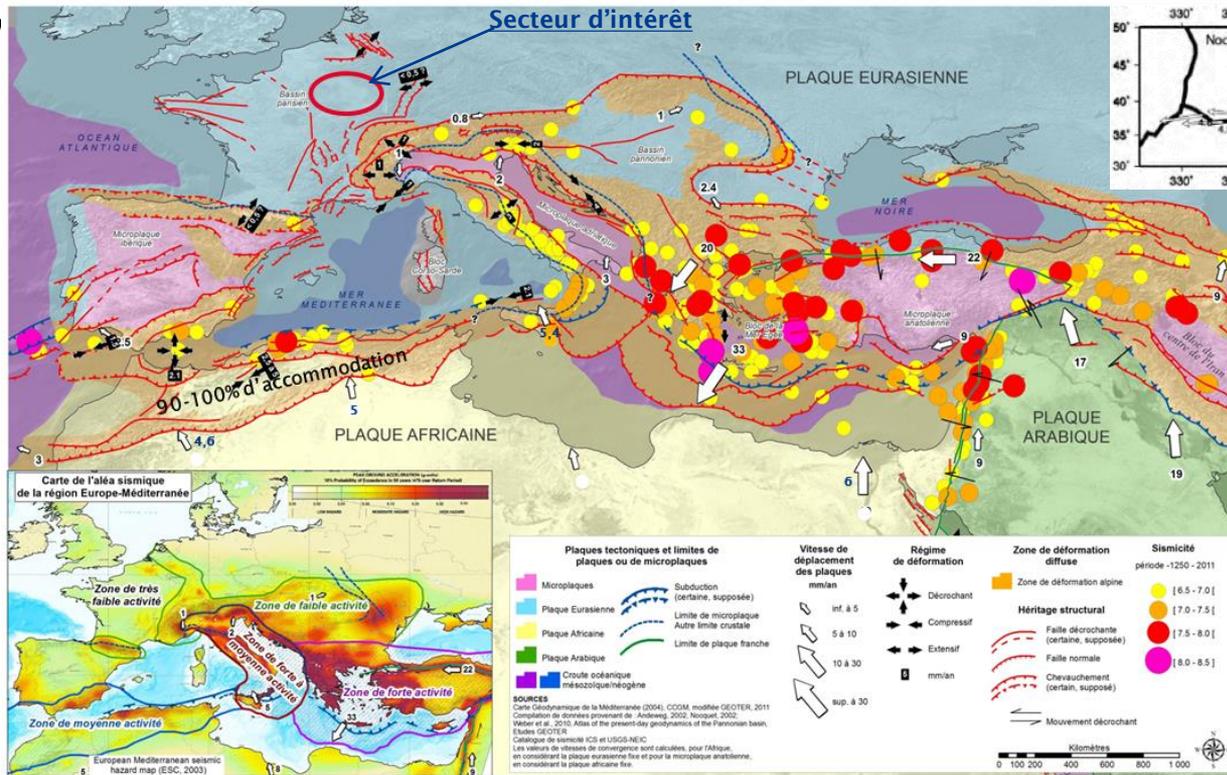
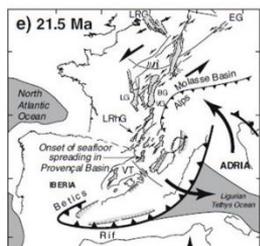
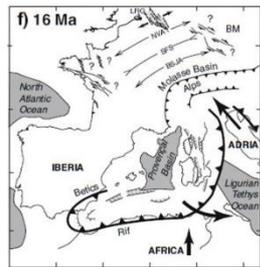
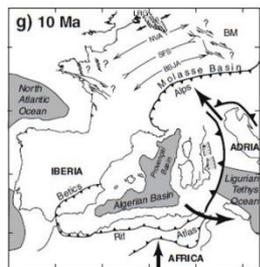
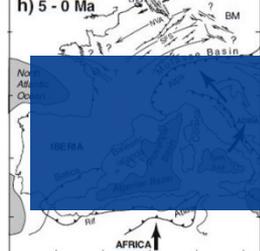


Vue générale des carottes reçues

3,89 m

Contexte géodynamique

Collision Afrique-Europe

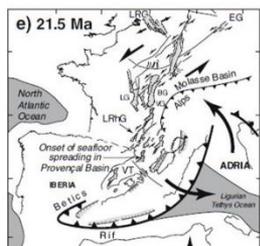
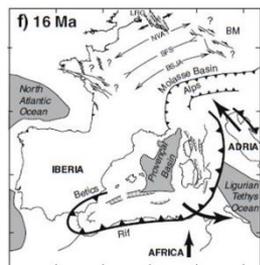
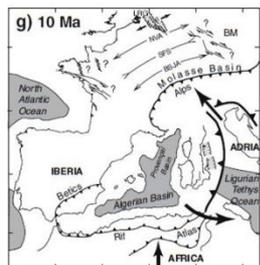
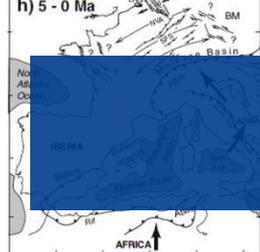


Contexte dynamique

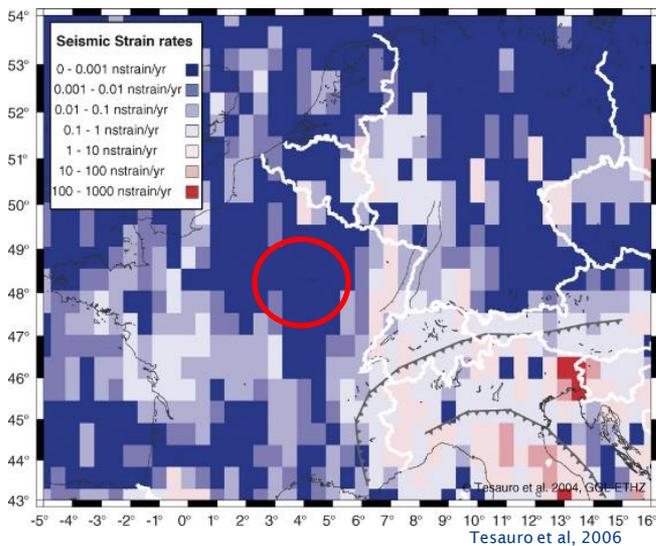
Taux et vitesses de déformation sur le Bassin parisien

Un taux de déformation nul sur le secteur du projet Cigéo et plus généralement sur le Bassin parisien

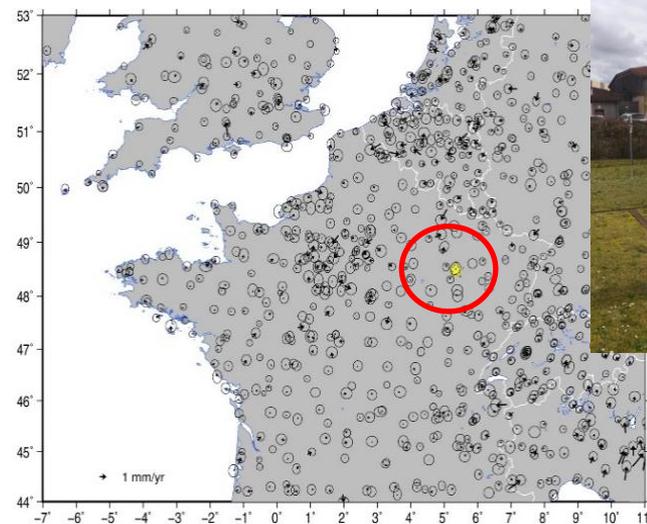
Pas d'écart par rapport à la plaque rigide eurasiennne ⇒ aucune déformation actuelle qui ne puisse être détectée dans la zone entourant le secteur du projet Cigéo.



Taux de déformation



Vitesse GPS BUAN vs plaque Eurasienne



Station GPS BUAN
(Bure-Andra)



Contexte sismique

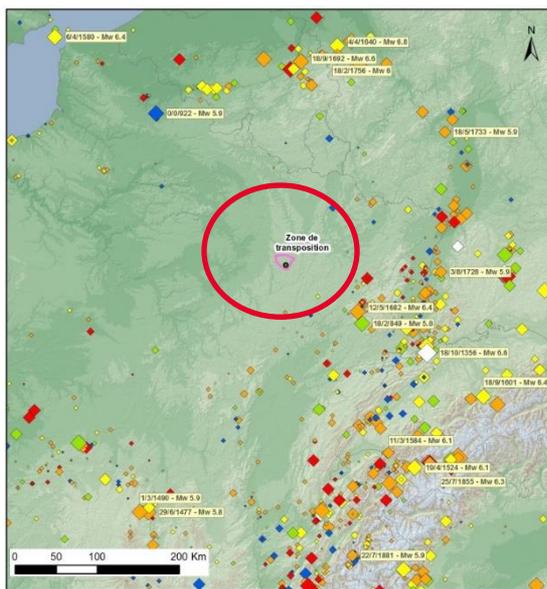
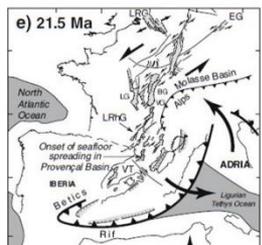
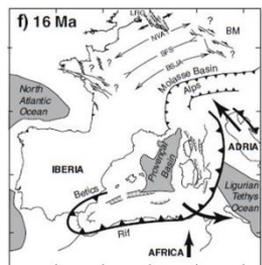
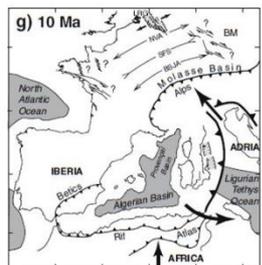
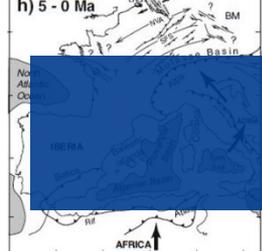
Sismicité historique et instrumentale

La sismicité historique

Archives et chroniques historiques

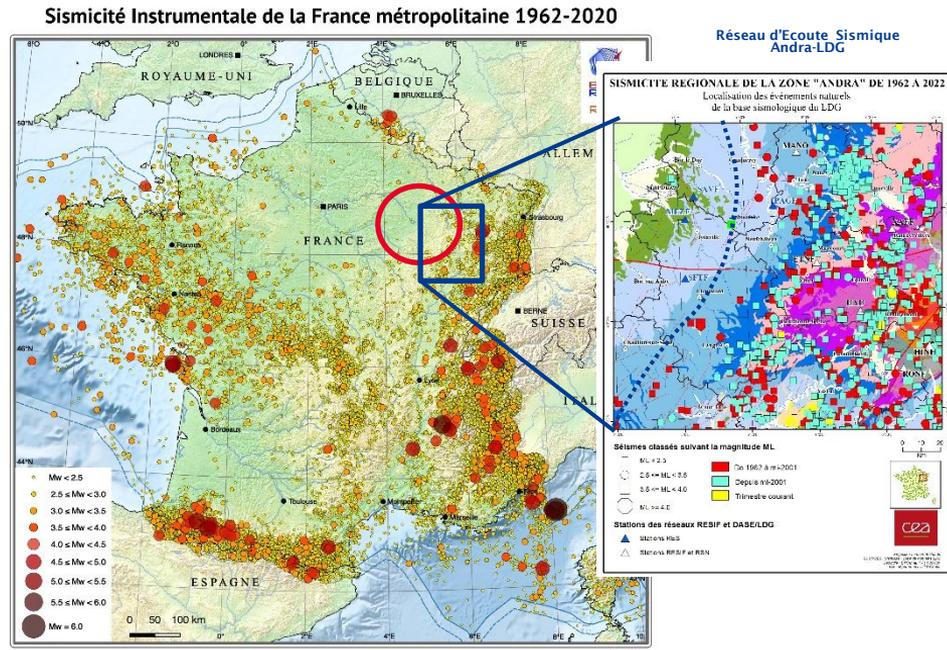
La sismicité instrumentale 1962-2022

Enregistrement par des instruments de mesure (sismomètres...)



Date: 20/04/2016
 Auteur: R. La Daille
 Document Name: Figure_003a.htm

DISTEC/DRG/GEO/23-0013



Ce document est la propriété de l'Andra. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

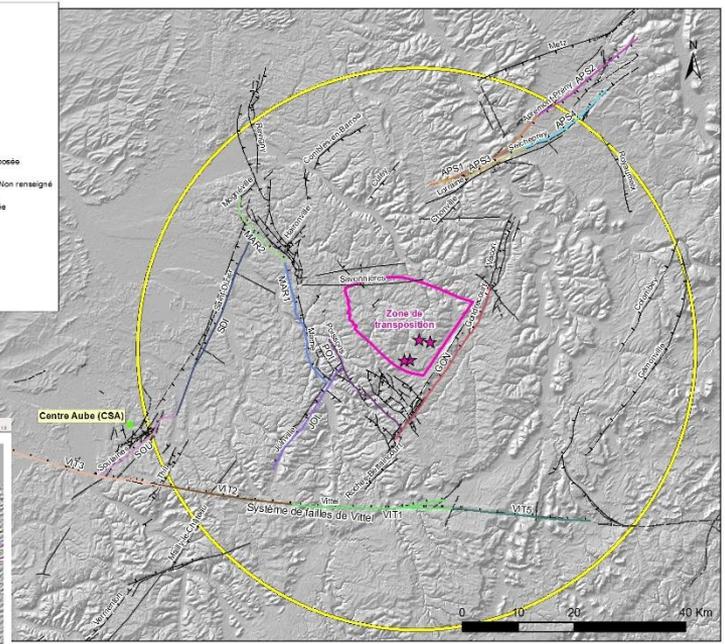
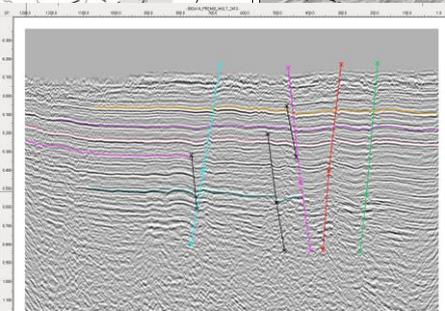
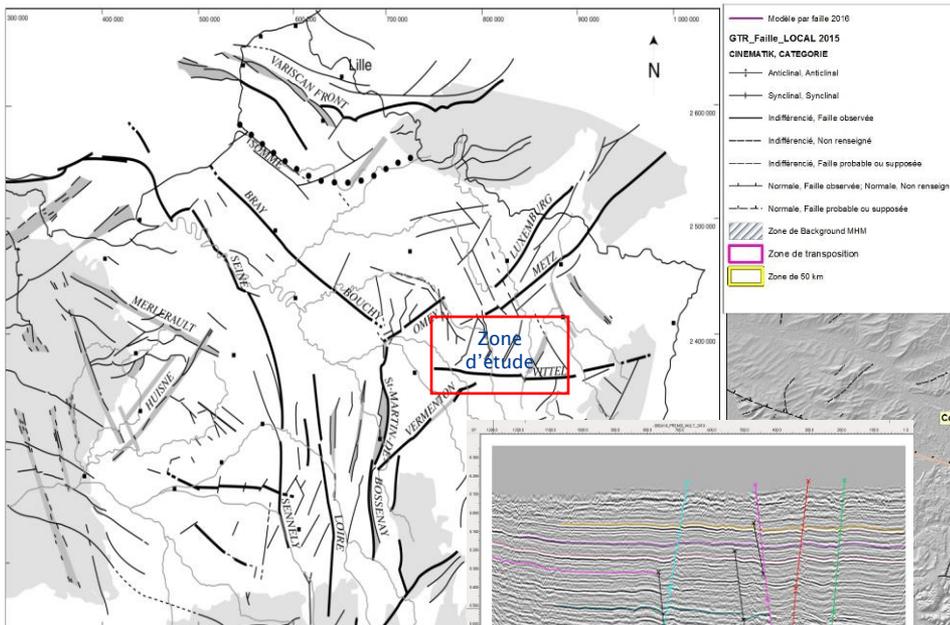
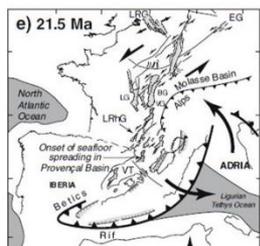
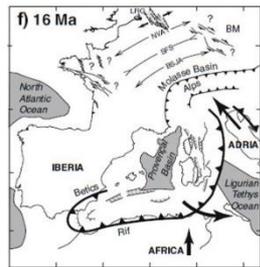
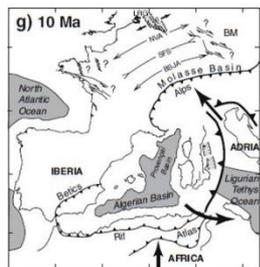
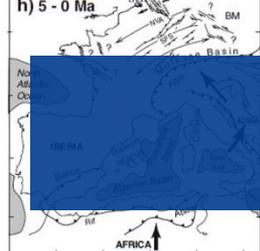


Un cadre structural simple

Bâti structural du Bassin parisien et de la région de Meuse/Haute-Marne

Schéma structural du Bassin parisien et
des régions avoisinantes

Schéma structural de la région
de Meuse/Haute-Marne



Contexte crustal

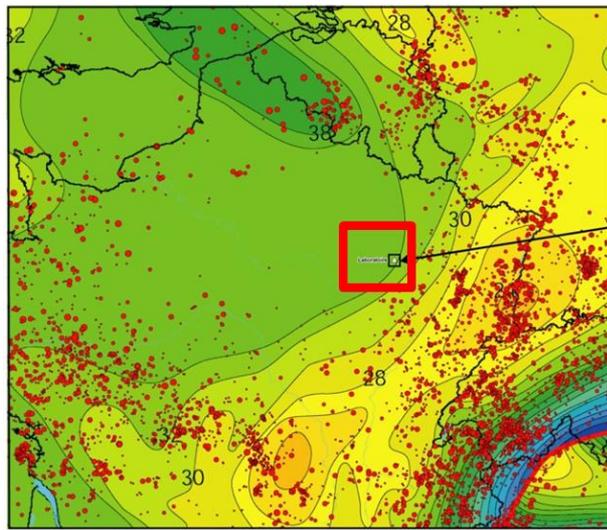
Relation entre sismicité et épaisseur de la croûte

Nombre/Magnitude des séismes augmentent vers l'est et le SE

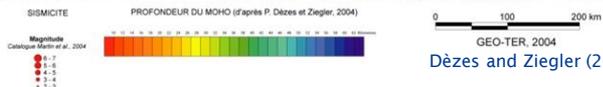
o Lien avec la profondeur du Moho

- Stabilité du domaine « Bassin parisien » sur lequel se trouve le projet Cigéo – Bloc rigide et stable en équilibre isostatique

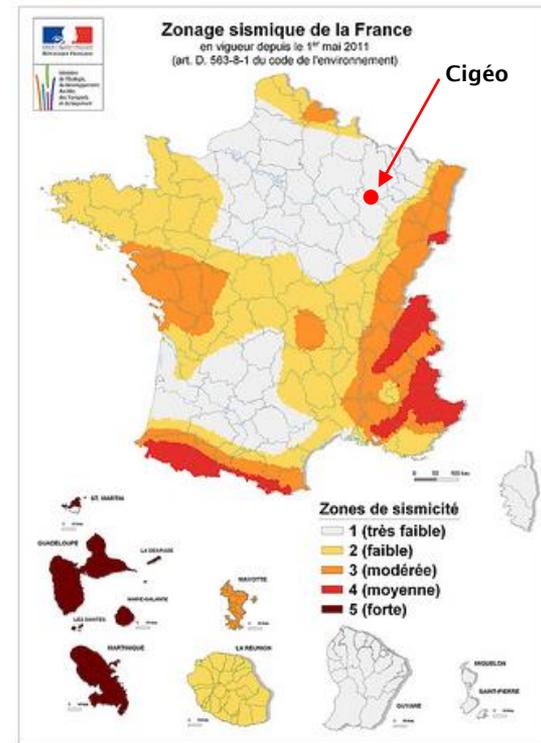
Profondeur du Moho et sismicité du Nord-Est de la France



Secteur
d'étude



Dèzes and Ziegler (2004)

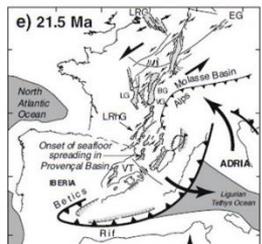
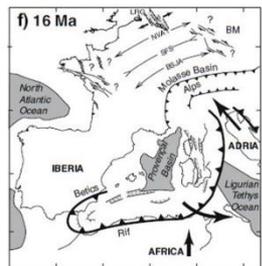
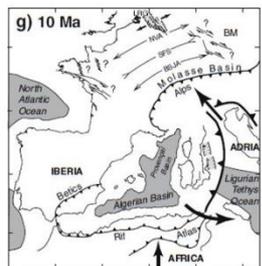
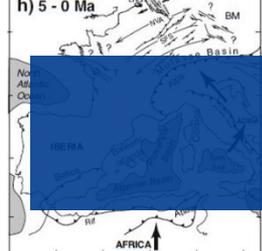


En résumé

Synthèse

La région de Meuse/Haute-Marne est caractérisée par :

- L'absence de sismicité historique et instrumentale; caractère asismique du Bassin parisien au regard des régions avoisinantes dites « actives » (Vosges, Rhin, Jura)
- Un taux de déformation nul à quasi nul
- L'absence d'indice néotectonique et de déformation récentes sur et au voisinage des failles; les failles sont inactives depuis 20 Ma
- Un contexte structural maîtrisé, clair et bien compris
- Une croûte épaisse en équilibre isostatique; le Bassin parisien se comportant comme un bloc rigide et stable – Déformations absorbées au pourtour

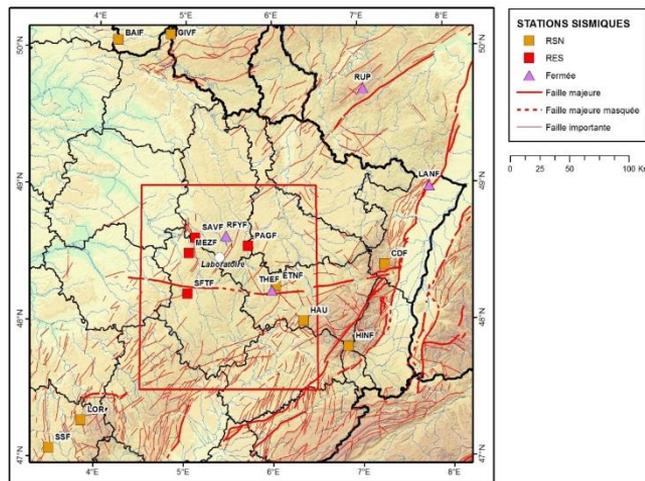




Les outils Andra : ex. RES & ACC

Caractérisation de la sismicité instrumentale

Le réseau d'Ecoute Sismique (RES) 1/2



Collaboration (2001+) Andra-CEA/LDG

Intégration au Réseau Sismique Numérique du CEA/DASE (données accessibles en ligne)

Objectifs

- Observer la sismicité naturelle dans l'environnement immédiat du site et aux alentours (R = 20-30 km)
- Analyser le cas échéant l'activité des failles encadrant le secteur (connues en surface ou oblitérées sous la couverture mésozoïque)

Résultats

- Détection des événements de très faibles magnitudes
- Discrimination entre événements de très faibles magnitudes d'origines naturelle et anthropique
- Localisation précise des épicentres de ces événements de différentes origines

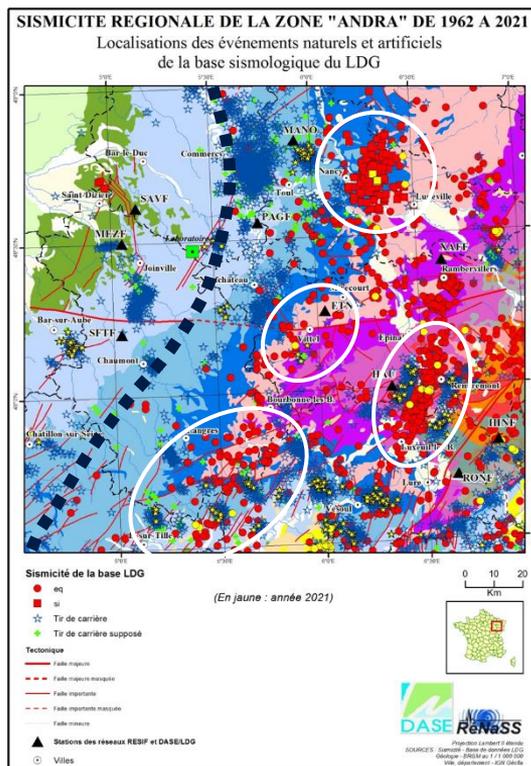


DISTEC/DRG/GEO/23-0013

Ce document est la propriété de l'Andra.
Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

Caractérisation de la sismicité instrumentale

Le réseau d'Ecoute Sismique (RES) 2/2



Deux régions distinctes

- Ouest : Région globalement asismique
 - Pas d'activité sismique
 - Pas d'activité le long ou au voisinage des failles majeures et mineures (F. de la Marne, Joinville, Vittel, Saint-Dizier et Gondrecourt)
- Est : Activité sismique notable et soutenue en limite du Bassin parisien
 - Quatre zones d'activité faible à modérée :
 - Toul-Nancy-Lunéville
 - Vittel
 - Vesoul-Lure
 - Plateaux bourguignon

Surveillance sismologique du Laboratoire souterrain Le réseau vélocimétrique et accélérométrique (ACC)

Réseaux vélocimétrique et accélérométrique (ACC)



Stations sismologiques [-490 m]



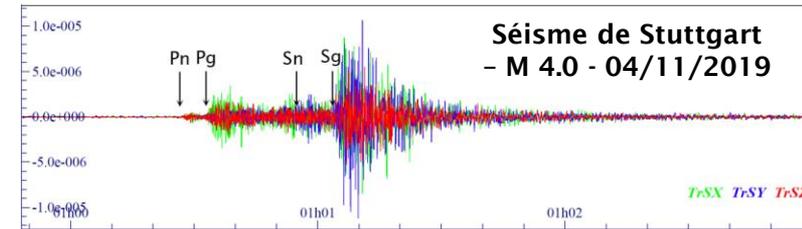
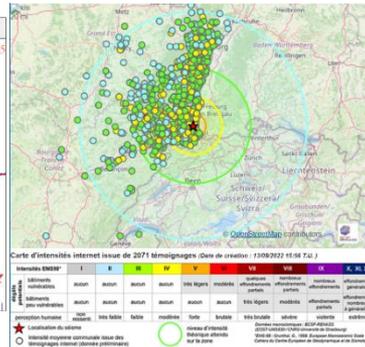
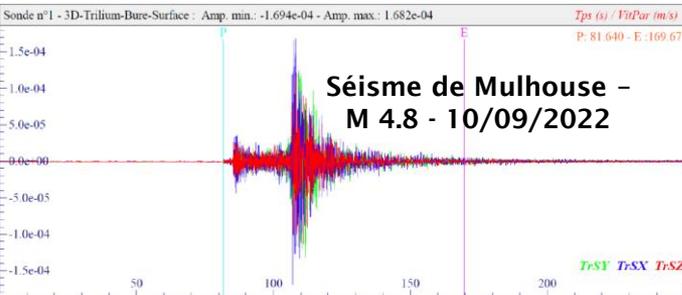
Collaboration Andra-Ineris-Seister

Objectifs

- Comprendre la **réponse** du massif géologique face à un **séisme** en termes d'amplification/atténuation
- Support pour les approches et applications locales

Dates clefs

- Démarrage en 2003 (GeoSig)
- Acquisition en continue 2011+ (GeoSig)
- Jouvence 2013+ (Trillium)
- Archivage en continue 2020+ (Trillium)



Surveillance sismologique du Laboratoire souterrain

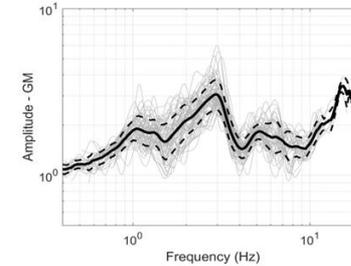
Evaluation des mouvements transférés en profondeur (ACC)

Objectifs

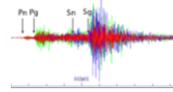
- Caractérisation de la **fonction de transfert** entre surface et profondeur et des **incertitudes associées**

Résultats

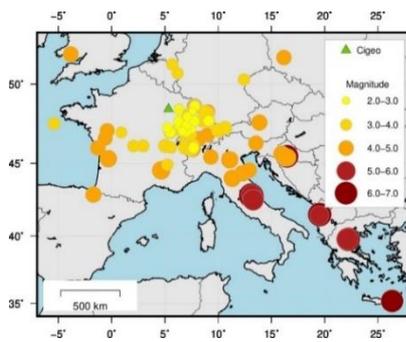
- **FT empirique [0,5-20 Hz] > 1**
- **Réduction** du mouvement sismique en profondeur (30-50%)



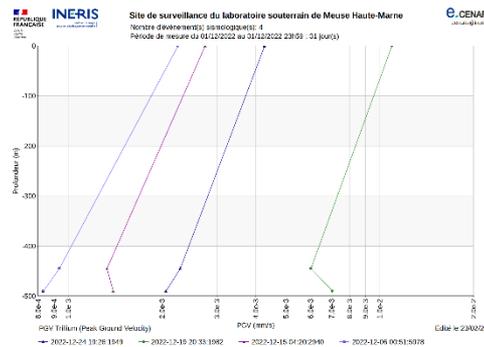
FT empirique Surface/fond (-490 m)



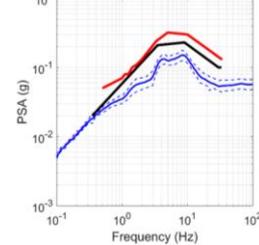
Base de données d'enregistrements sismiques



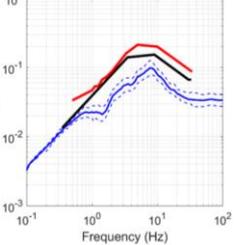
Courbe de la relation vitesse particulaire/profondeur



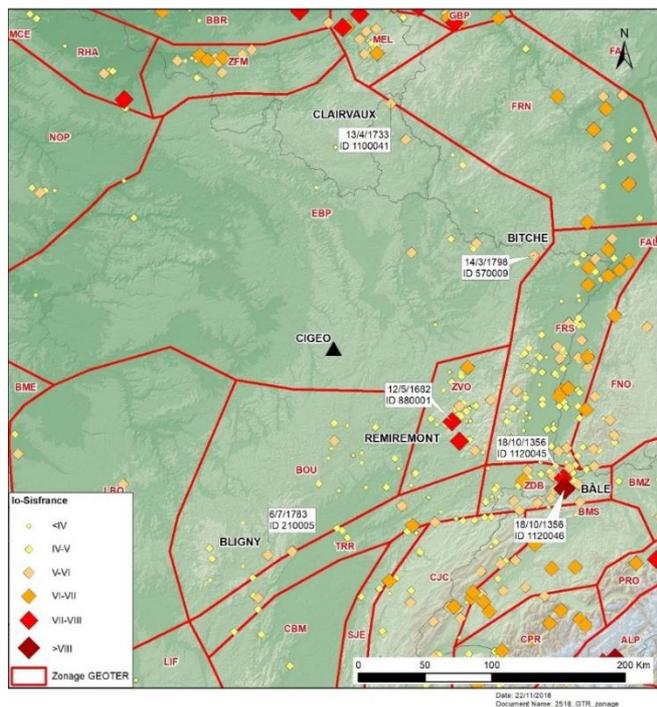
CIGEO Response spectra at -490m Empirical TF - Horizontal Geometric mean



CIGEO Response spectra at -490m Empirical TF - Vertical component



Spectre SMF transféré et SDD (-490 m)



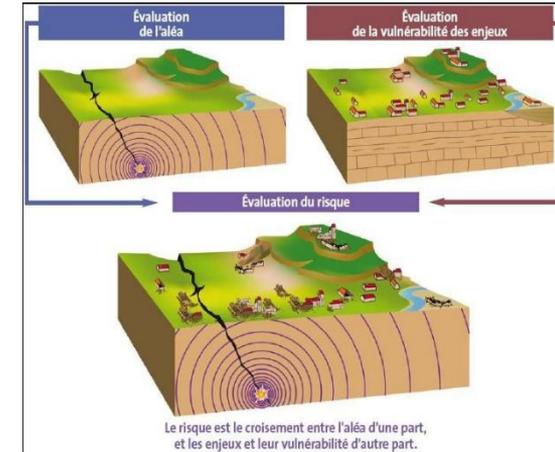
L'évaluation de l'aléa sismique et la démarche Andra

L'évaluation de l'aléa sismique

Quelques rappels – Risque et Aléa sismiques – INB (eg. Cigéo)

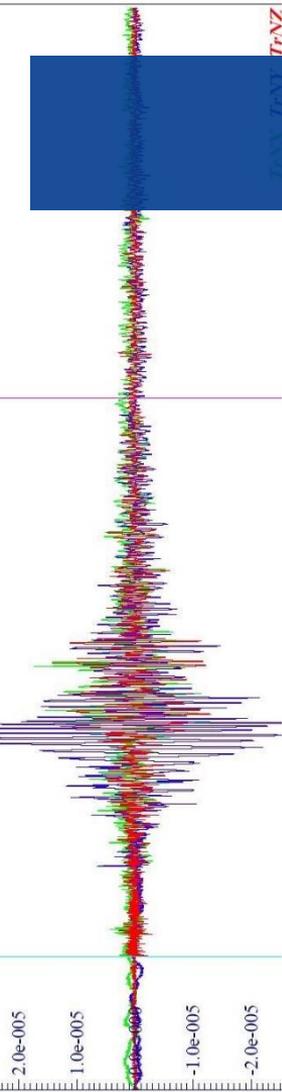
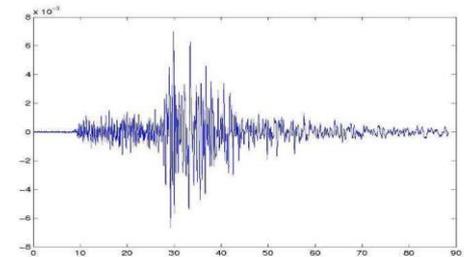
Risque = Aléa x Vulnérabilité x Enjeu

- Aléa : mouvement du sol à considérer
- Vulnérabilité : état du bâti (résistance à la construction)
- Enjeu : importance du bâti (INB, bâtiment public, habitation particulière, etc.)
- Risque : éventualité d'occurrence d'un événement dommageable lié à l'exposition d'enjeux vulnérables à un aléa



INB : RFS 2001-01 & Guide ASN 2008 (Cigéo)

- Evaluer l'aléa sismique en un site consiste à déterminer les mouvements sismiques du sol contre lesquels se protéger



L'évaluation de l'aléa sismique (phase exploitation)

Règle fondamentale de sûreté 2001-01 pour les INB (1/2)

Principes de l'approche déterministe

- L'évaluation de l'aléa sismique en application de la RFS 2001-01 s'appuie sur la définition des caractéristiques de "Séismes Maximaux Historiquement Vraisemblables" (SMHV).
- SMHV : séismes les plus pénalisants susceptibles de se produire sur une période de durée comparable à la période historique.
- Cette démarche nécessite l'identification des séismes qui, déplacés à l'intérieur de leur zone sismotectonique, sont susceptibles de générer les intensités les plus fortes sur le site étudié. Ces séismes sont dénommés séismes de référence.

Démarche

- Choix d'un zonage sismotectonique de référence pour l'étude
- Caractérisation de l'activité des sources (SMHV ou séisme de référence)
- Estimation des conditions de sol sur le site (rocher, sol...)
- Calcul du mouvement vibratoire en surface et détermination des spectres de réponse élastiques des SMHV et paléoséismes

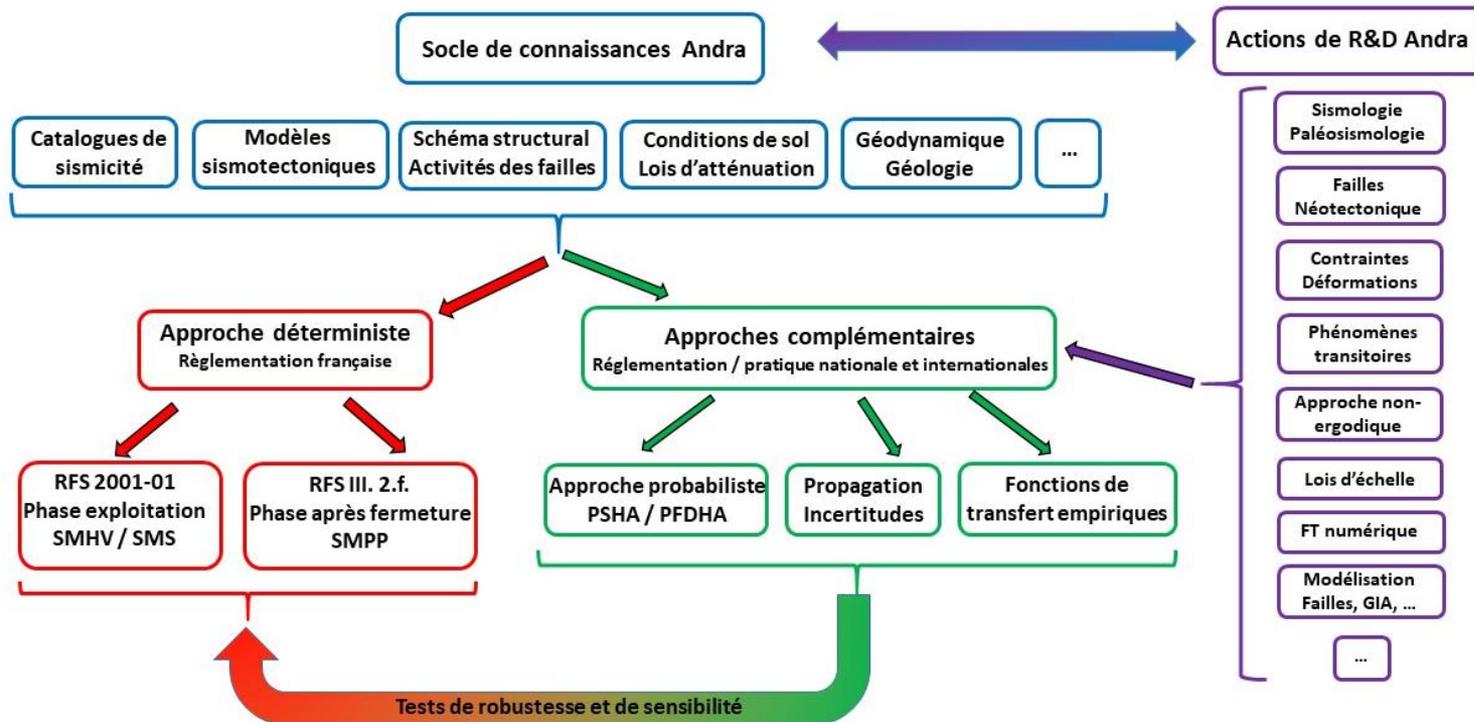
L'évaluation de l'aléa sismique (phase exploitation)

Règle fondamentale de sûreté 2001-01 pour les INB (2/2)

- Afin de tenir compte des incertitudes inhérentes à la détermination des caractéristiques des SMHV (I0, M/Z, D), une marge de sécurité conventionnelle est forfaitairement appliquée au SMHV pour établir le **Séisme Majoré de Sécurité (SMS)**
 - Magnitude SMS = Magnitude SMHV + 0,5
 - Intensité (site) SMS = Intensité (site) SMHV + 1
 - Calcul du mouvement vibratoire en surface (application d'une loi d'atténuation aux sources potentielles) et détermination des spectres de réponse élastiques des SMS et paléoséismes
- ⇒ Choix du SMS de référence de site = enveloppe des scénarios SMS

L'évaluation de l'aléa sismique

Schéma général de la démarche de Andra

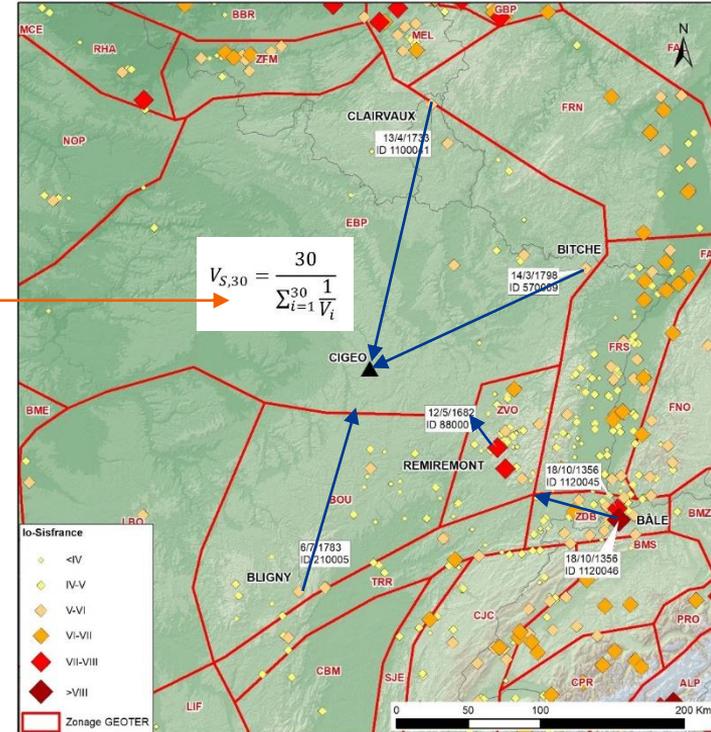


L'évaluation de l'aléa sismique - RFS 2001-01- Exploitation

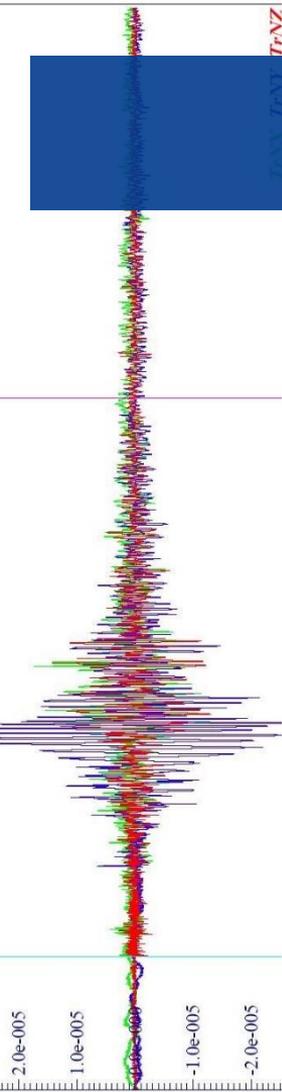
Les séismes notables et de référence (SMHV) pour Cigéo

Identification et caractéristiques des séismes de référence retenus dans le zonage sismotectonique

Estimation des conditions de sol sur le site (rocher, sol...)



NUMEVT	Qlo	Opos	Date	Name	LAT	LON	Io - Sisfrance	Mw_FCAT-17	Profondeur (km)_FCAT-17	CODEZONAGE	Distance après translation (km)	Distance hypocentrale (km)	L_SITE
880001	B	C	12/5/1682	HAUTES-VOSGES (REMIREMONT)	47.58	6.31	8.0	6.3	17.0	ZVO	55-75	57.6-76.9	6.2
1100041	E	E	13/4/1733	ARDENNES (CLAIRVAUX ?)	50.06	6.01	6.0	4.5	11.0	EBP	0-0	17-17	6.0
570005	I	I	29/6/1477	COTES DE MOSELLE (METZ)	49.07	6.11	6.0	4.5	11.0	EBP	0-0	17-17	6.0
570009	C	E	14/3/1798	PLATEAU LORRAIN (BITCHE)	49.03	7.26	6.0	4.5	11.0	EBP	0-0	17-17	6.0
210031	E	E	18/2/849	HAUTES-VOSGES (REMIREMONT ?)	47.50	6.35	8.0	5.9	11.0	ZVO	55-75	57.6-76.9	5.7
1120046	K	C	18/10/1356	JURA SUISSE (BALE)	47.29	7.36	9.0	6.5	11.0	ZDB	122-142	123.2-143	5.6
210005	B	C	6/7/1783	VALLEE DE L'OUCHE (BLIGNY)	47.06	4.38	6.0	5.1	17.0	BOU	26-36	31.1-39.8	5.6



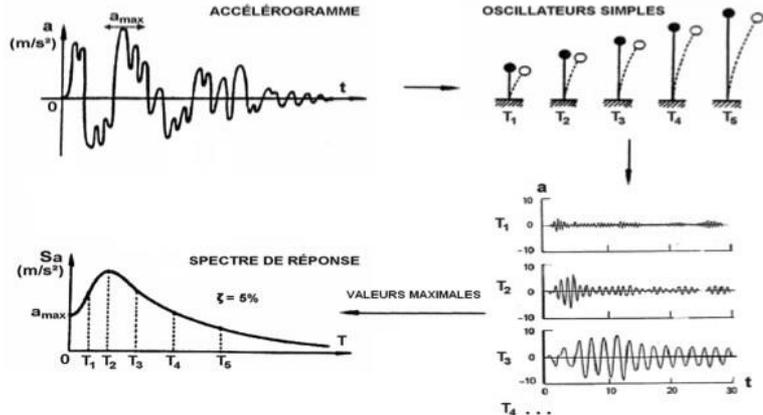
L'évaluation de l'aléa sismique - RFS 2001-01 - Exploitation

Calcul des spectres de réponse pour les scénarios sismiques SMHV / SMS

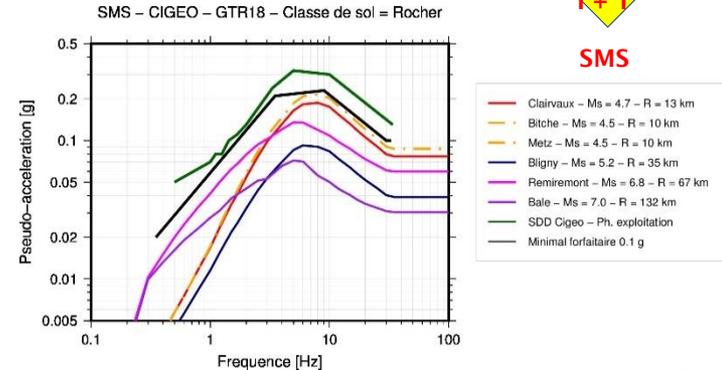
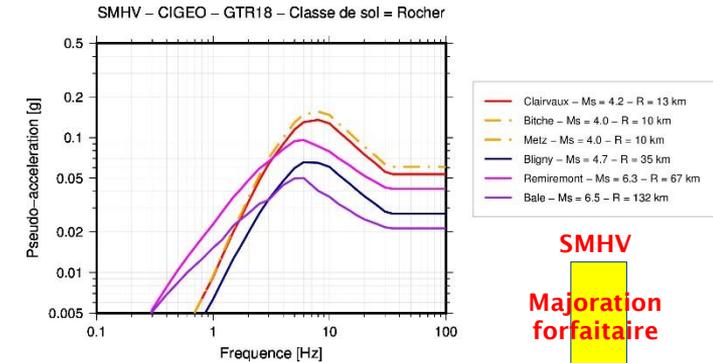
Calcul des spectres :

- Loi d'atténuation (RFS 2001-01, BT 2003)
 - $\log_{10} PSA = aM + bR - \log_{10}R + c$
- Ms, distance hypocentrale et classe de sol ($V_{s30} > \text{ou} < 800 \text{ m/s}$)
- Gamme de fréquence 0,25 - 33 Hz

Le Spectre De Dimensionnement (SDD) \geq Spectre Minimal Forfaitaire (SMF)



DISTEC/DRG/GEO/23-0013



L'évaluation de l'aléa sismique (après fermeture)

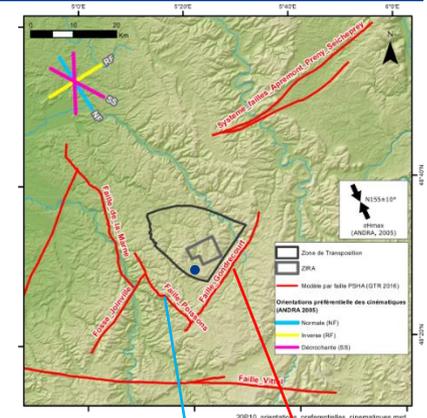
Application du Guide ASN 2008 (SMPP)

Guide ASN 2008 : démarche à appliquer pour évaluer l'aléa sismique du stockage géologique en phase post-fermeture :

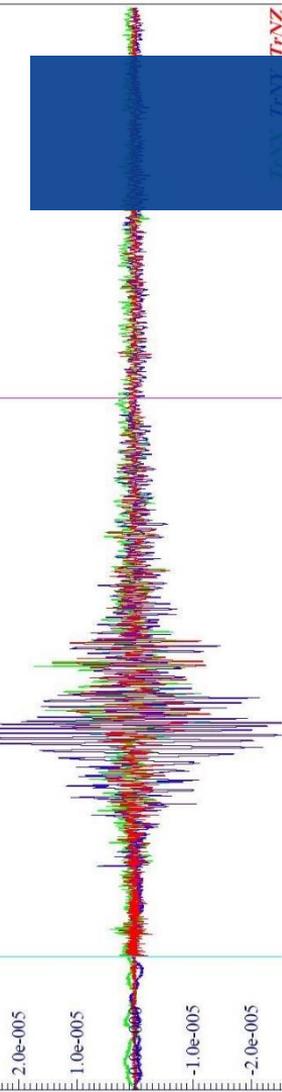
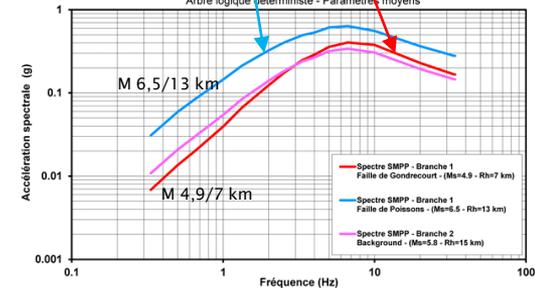
- Retenir un niveau d'activité sismique susceptible d'être rencontré au cours des diverses périodes étudiées >> période historique

⇒ Notion de **Séisme Maximal Physiquement Possible (SMPP)** dont les caractéristiques doivent être recherchées sur la base du contexte tectonique du site (schéma structural Andra)

- Identifier les failles à l'échelle régionale et locale
- Faire l'hypothèse que les failles sont actives et qu'elles puissent engendrer un séisme
- Définition des magnitudes maximales (lois d'échelle publiées)
- Spectres de réponse SMPP « best-estimate » en termes de magnitude et de distance hypocentrale



Andra - Site CIGEO - Zone de descenterie
Spectres SMPP résultant de l'application de la RFS II 2.F et du guide ASN (2008) pour les trois séismes de référence retenus
Arbre logique déterministe - Paramètres moyens

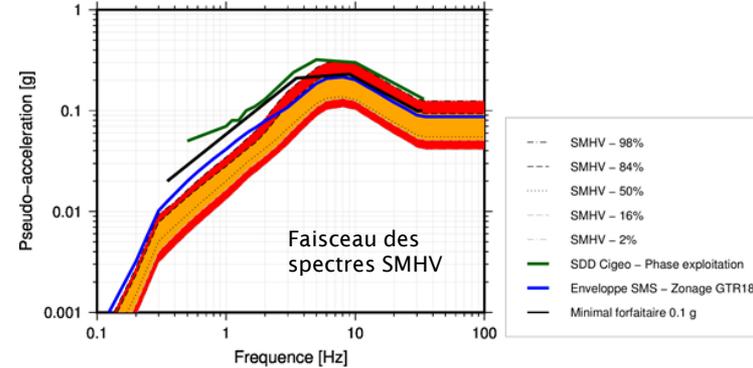


Deux approches complémentaires

Tests de robustesse et de sensibilité au SMS en surface

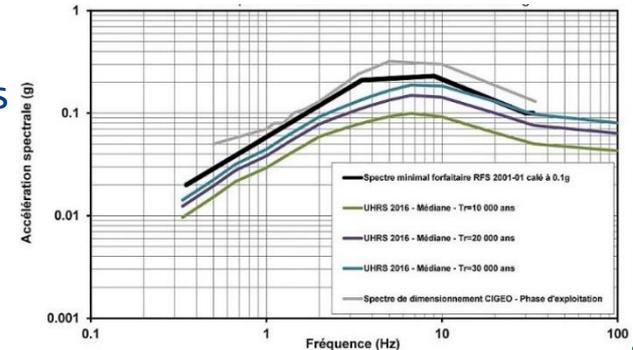
Analyse de robustesse des SMHV vs SMS

- Evaluer si le spectre SMS retenu pour le site couvre les incertitudes associées à la définition des SMHV
 - Enveloppe des SMS et SMF > faisceau SMHV 84 %
 - SDD enveloppe du faisceau SMHV 98 %



Evaluation probabiliste de l'aléa sismique

- Spectre de réponse d'aléa uniforme défini à différentes périodes de retour (10 000, 20 000, 30 000 ans...)
 - SMF enveloppe de l'UHRS à 30 000 ans de période de retour



En résumé

La démarche Andra dans l'évaluation de l'aléa sismique

L'Andra s'appuie depuis plus de 20 ans sur un socle de connaissances exhaustif et des actions de R&D à jour de l'état de l'art ainsi que sur des outils performant (RES et ACC) qui lui permettent :

- D'avoir une vision claire du contexte géodynamique et sismotectonique de la région
 - Un schéma structural robuste et cohérent à l'échelle régionale et locale
 - Caractère « asismique » de la région
 - Inactivité des failles depuis 20 Ma
- De mener des évaluations d'aléa sismique en conformité avec la réglementation française
- Combinées à des approches probabiliste et statistique
 - Robustesse des choix pris par l'Andra pour le projet Cigéo en termes de :
 - Spectre d'aléa (SMS)
 - Spectre de dimensionnement - SDD (support pour le dimensionnement des installations et ouvrages)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !

Réplique du sismographe de Zhang Heng (132 AD)
Dynastie Han