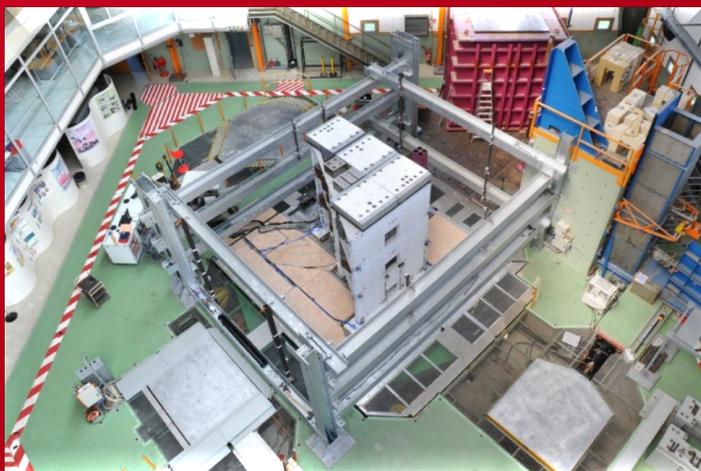
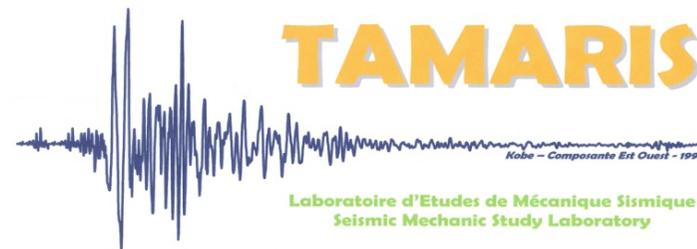


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



www.cea.fr



Usage de la simulation dans la prédiction des risques telluriques

Evelyne FOERSTER | evelyne.foerster@cea.fr

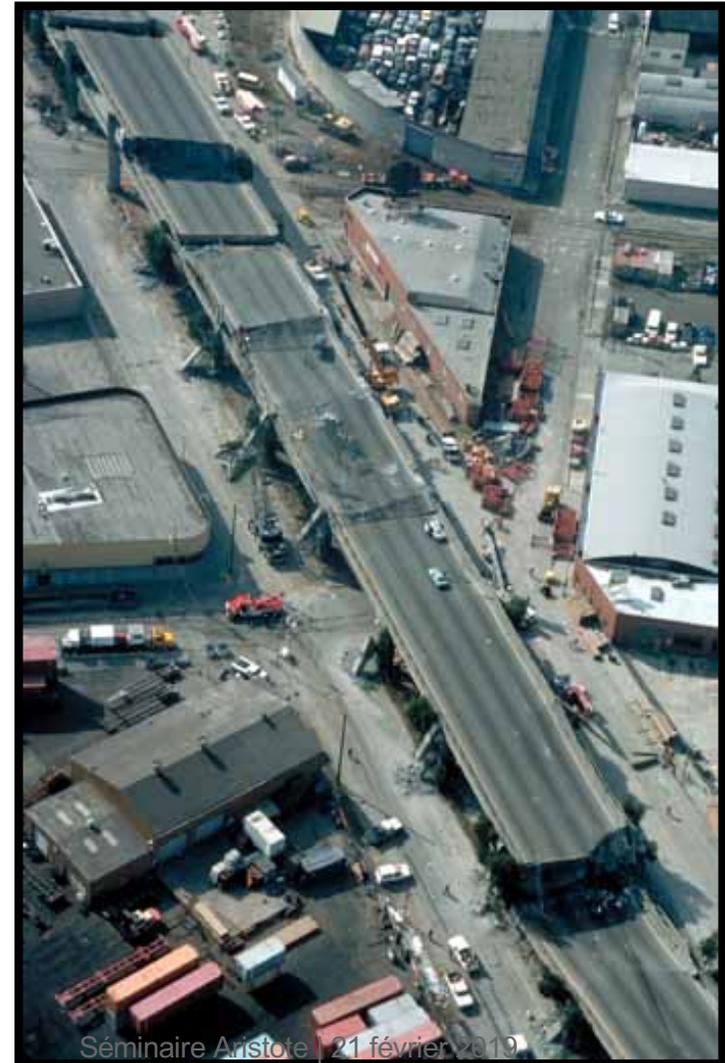


université
PARIS-SACLAY

SÉMINAIRE ARISTOTE – 21 FÉVRIER 2019

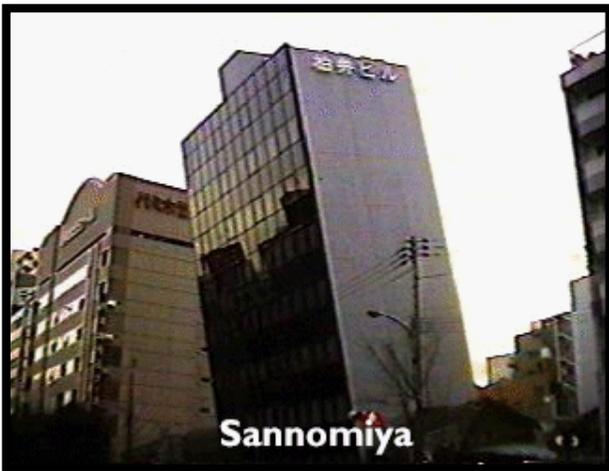
Ouvrages et infrastructures

Séisme Loma Prieta, Ca., 1989



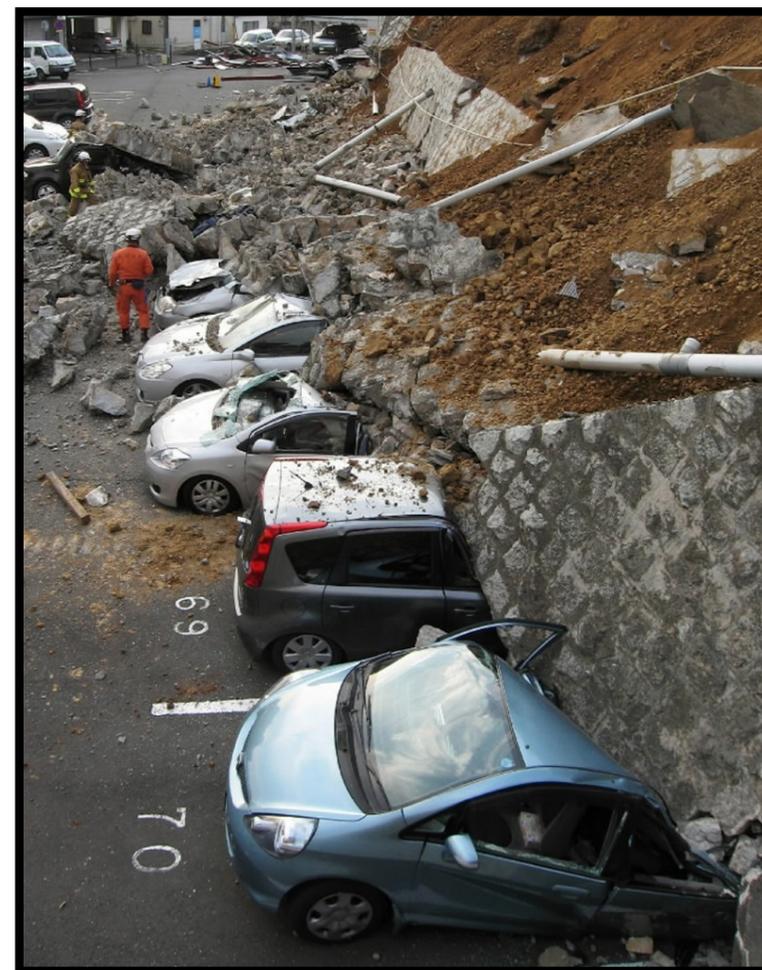
Ouvrages et infrastructures

Séisme Kobe, Japon, 1995



Ouvrages et infrastructures

Séisme Tohoku, Japon, 2011



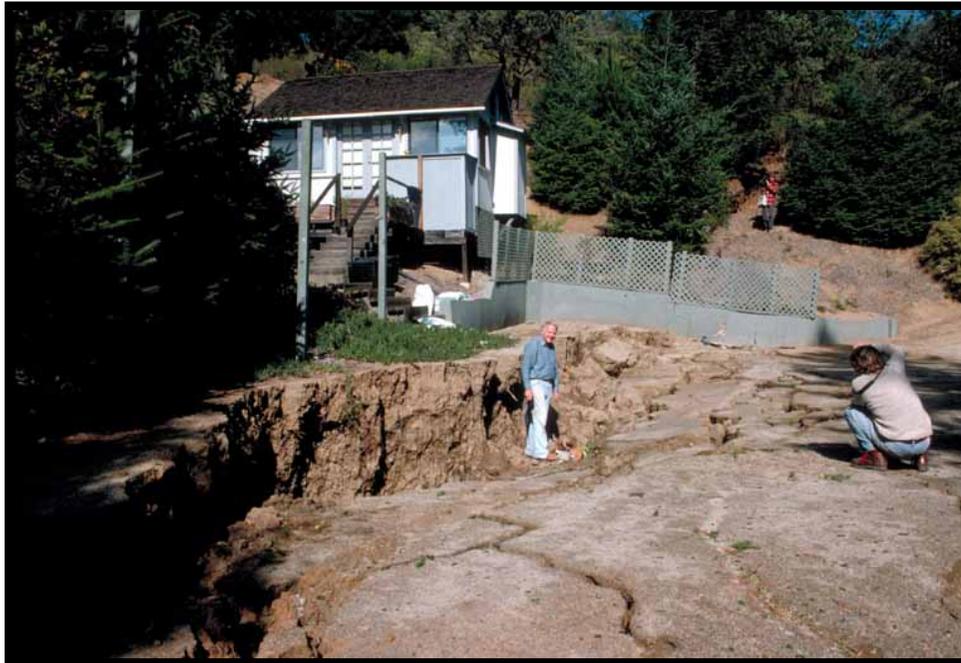
Ouvrages et infrastructures

Séisme Tohoku, Japon, 2011



Mouvements de terrain

Séisme Loma Prieta, Ca., 1989



Mouvements de terrain

Séisme Hokkaido, Japon, 2018



Tsunamis

Séisme Tohoku, Japon, 2011

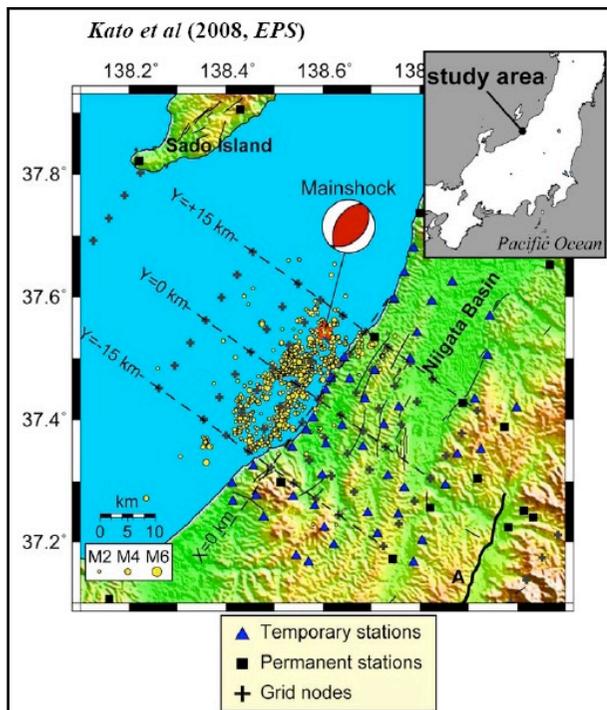


Tsunamis

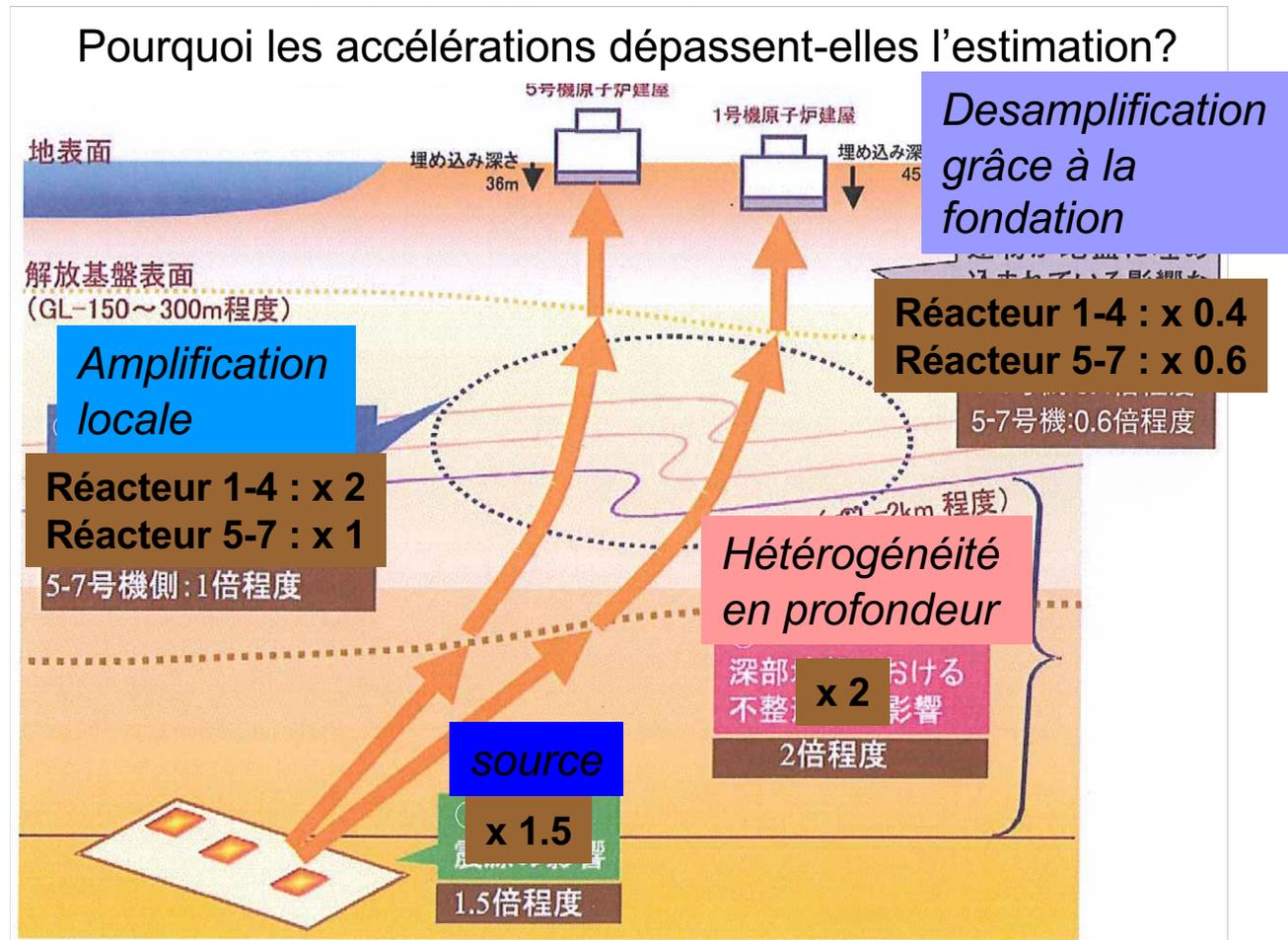
Séisme Tohoku, Japon, 2011



Mieux évaluer les conséquences



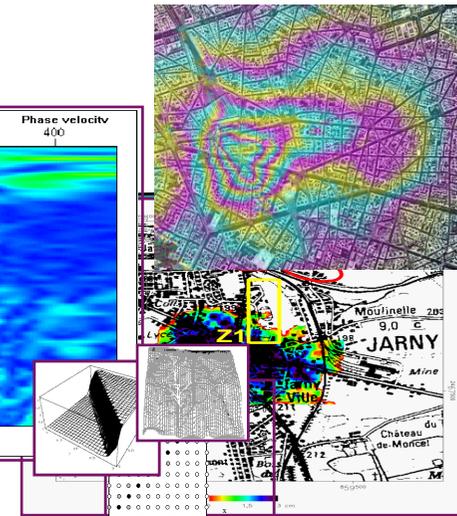
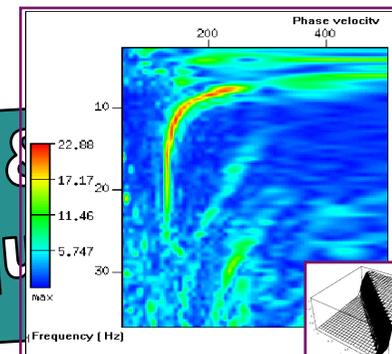
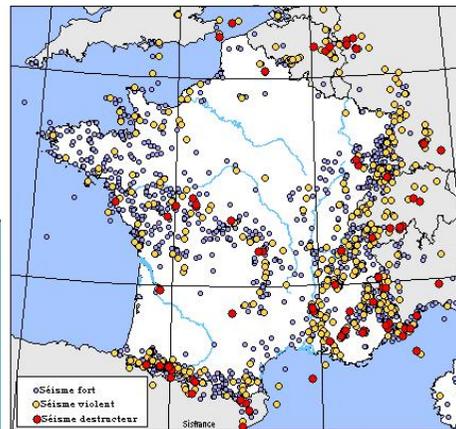
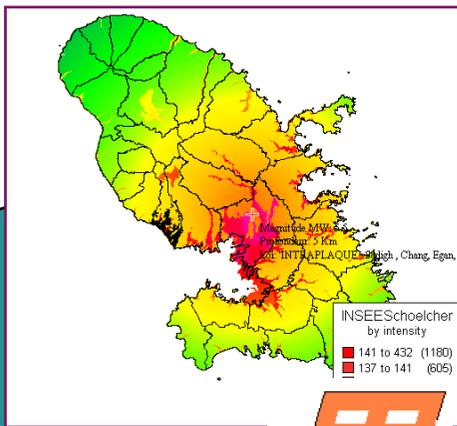
Séisme de Niigata, Chuetsu-Oki (M6.6) en 2007



Rapport TEPCO (mai 2008, en japonais)

Évaluer, prévenir et gérer les risques

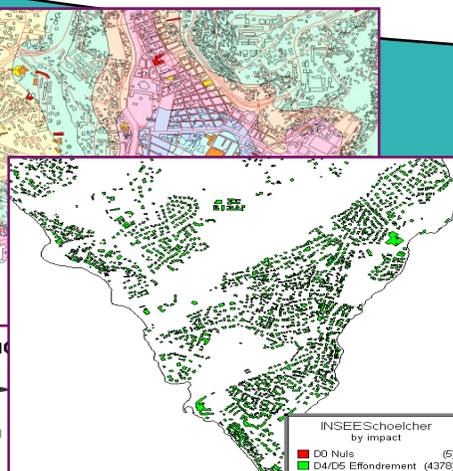
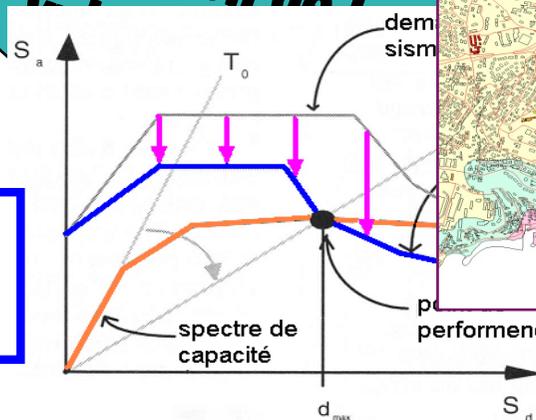
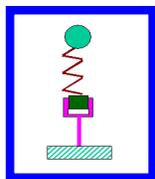
- Identifier, comprendre et quantifier les processus générateurs de l'aléa à différentes échelles (régionale, locale) :
 - Origine (source sismique, glissement sous-marin, éruption...)?
 - Risques de propagation (distances, durées) et effets locaux (sites)
 - Incertitudes (aléatoires, épistémiques, ...)
 - Anticiper les conséquences potentielles sur les zones exposées (territoires, villes, sites industriels, ...):
 - Fragilité des systèmes et de leurs composants
 - Probabilités de dommages directs et indirects
 - Incertitudes (aléatoires, épistémiques, ...)
- ⇒ **Simulation** nécessaire pour quantifier les processus, les conséquences et les incertitudes
- ⇒ **Couplage** entre observations/expérimentations et simulations



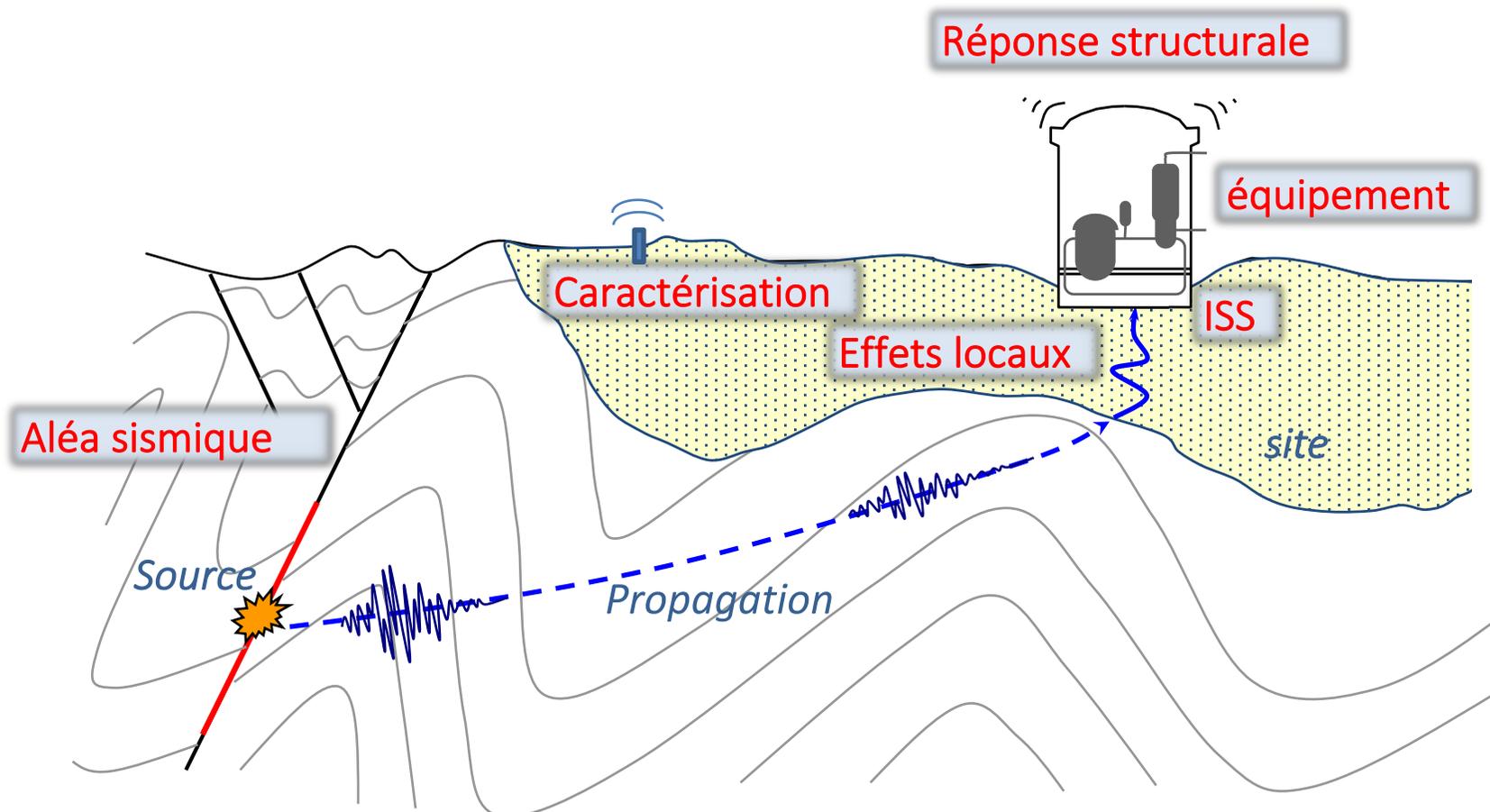
gestion des risques

Evaluation de l'

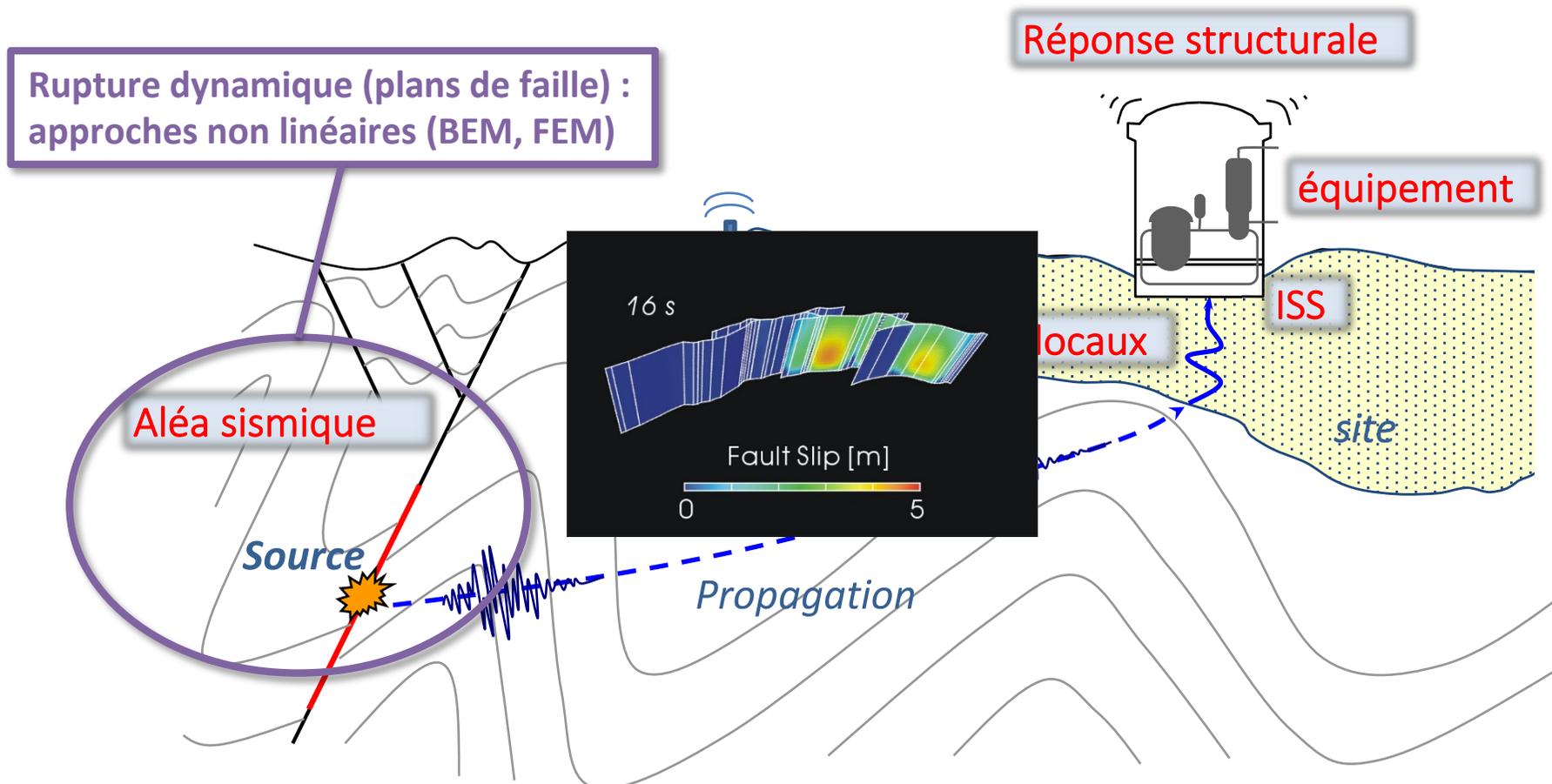
Evaluation du risque



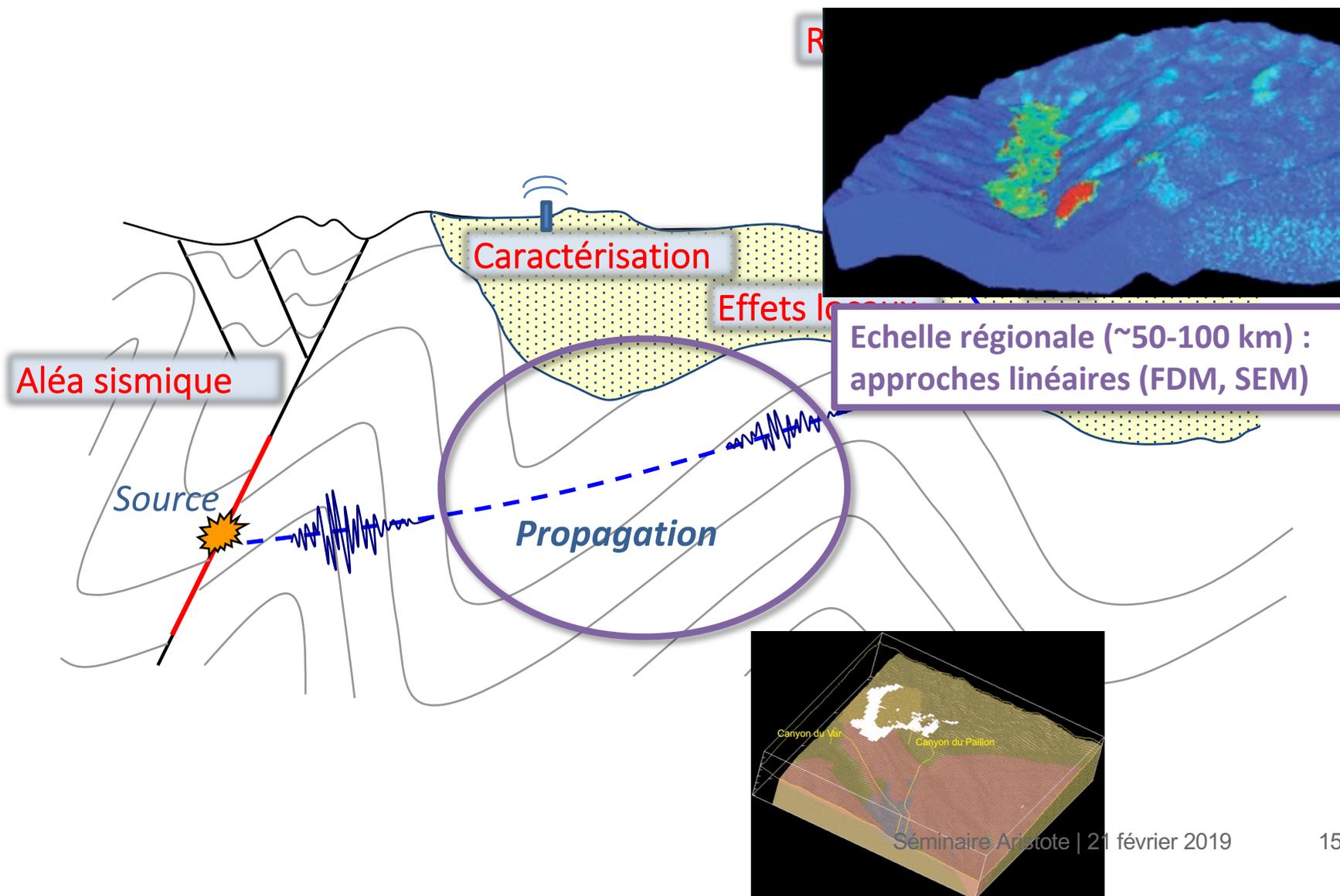
Chaîne de simulation pour le risque sismique



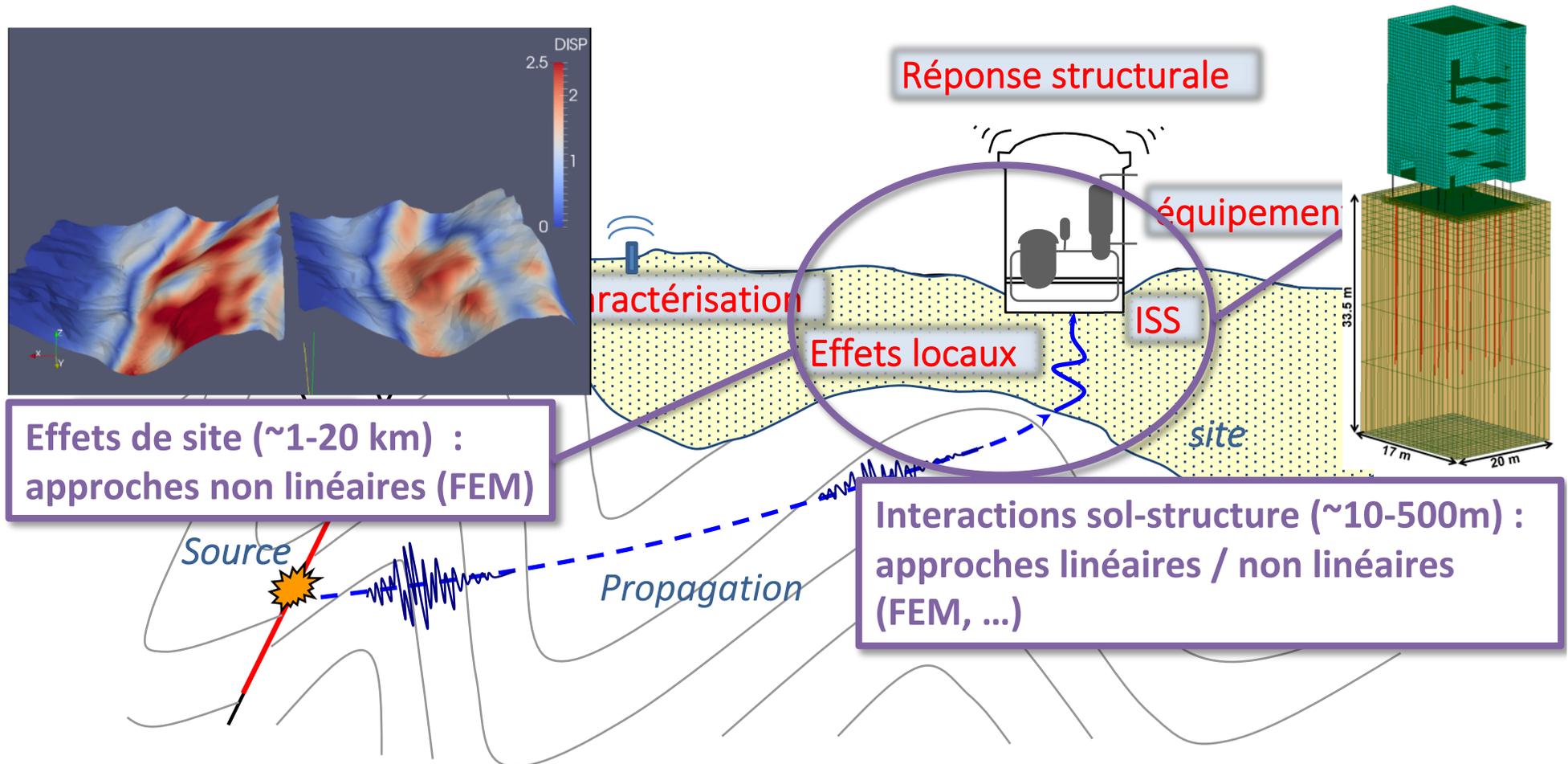
Chaîne de simulation pour le risque sismique



Chaîne de simulation pour le risque sismique



Chaîne de simulation pour le risque sismique



Chaîne de simulation pour le risque sismique

Vulnérabilité des ouvrages / équipements
(~10-100 m) : approches linéaires et non
linéaires (FEM, ...)

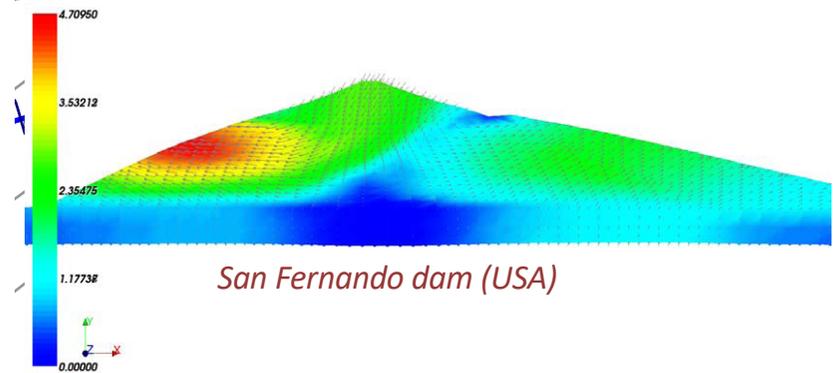
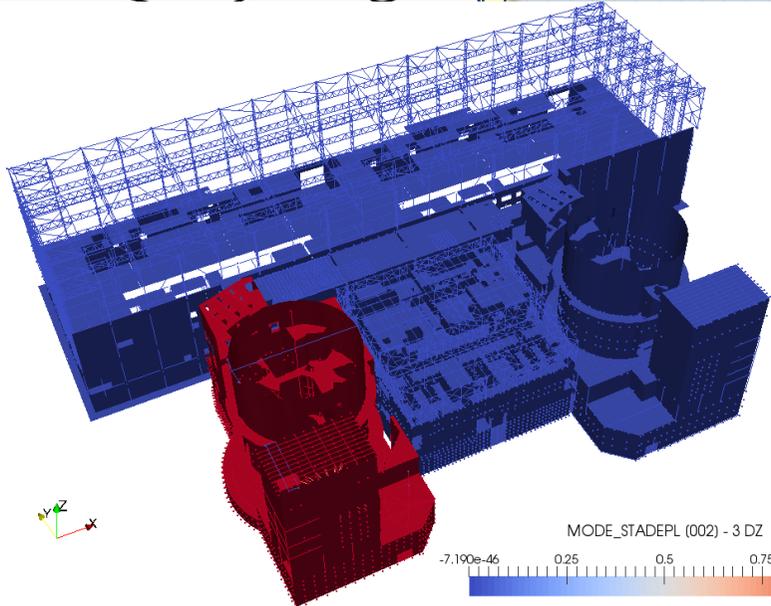
Réponse structurale

équipement

ISS

effets locaux

Alé



San Fernando dam (USA)



Nécessité d'équipes « intégrées » ou de collaborations de proximité :

- Sciences de la Terre : géologie structurale, sismo-tectonique, sismologie, géophysique
- Ingénierie : géotechnique, génie civil
- Mathématiques appliquées
- Informatique scientifique



*Seismology and Earthquake engineering
for rISk assessMent (Paris-Saclay
Research Institute)*

école
normale
supérieure
paris-saclay



Pour des calculs sismiques physiquement réalistes :

■ Dynamique transitoire 3D :

- Comportement linéaire / non linéaire des matériaux traversés (selon le niveau sismique attendu)
- Discontinuités (plans de faille, fissuration pour les structures, etc.)

■ Précision : nécessité d'une discrétisation fine des longueurs d'ondes pour la propagation dans les milieux traversés

■ Différentes fréquences d'analyse :

- ❑ ~ 0 - 30Hz pour les sols
- ❑ ~ 0 - 50 Hz pour les structures (pour capturer les modes supérieurs)
- ❑ > 100Hz pour les équipements

⇒ Pas de discrétisation allant de **quelques centimètres à centaines de mètres**

⇒ **Besoin d'optimiser les codes de simulations :**

- Performances : parallélisation, ...
- Méthode de modélisation : méta-modèles, réduction de modèle (e.g. PGD, ...)
- ...

- SEM (Spectral Element Method) : propagation d'ondes en milieux (visco-) élastiques

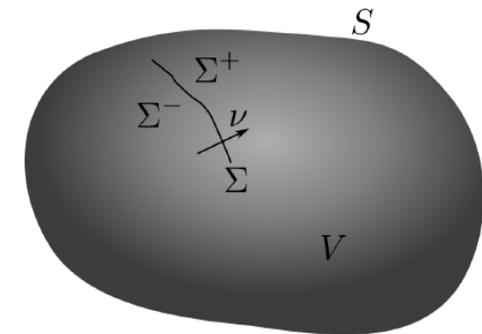
Faccioli et al., 1997 & Komatitsch, 1997

$$\rho \ddot{u}_i = f_i + \tau_{ij,j}$$

- $\rho \rightarrow$ material density
- $\ddot{u}_i \rightarrow i$ -th component of acceleration
- $\tau_{ij,j} \rightarrow$ spatial derivative of the stress tensor component τ_{ij} with respect to x_j
- $f_i \rightarrow i$ -th component of body force

$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{v}^T \cdot \ddot{\mathbf{u}} d\Omega = \int_{\Omega} \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{v})^T : \boldsymbol{\tau} d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{f} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{T} d\Gamma$$

- $\Omega \rightarrow$ volume of the domain
- $\Gamma \rightarrow$ surface of the domain
- $\boldsymbol{\epsilon} \rightarrow$ virtual strain tensor
- $\mathbf{v} \rightarrow$ virtual displacement vector
- $\mathbf{f} \rightarrow$ body force vector
- $\mathbf{T} \rightarrow$ traction vector acting on Γ



- SEM (Spectral Element Method) : propagation d'ondes en milieux (visco-) élastiques
 - Résolution de type Galerkin continue pour la formulation faible
 - Approximation via des polynômes de Lagrange (orthogonalité) et quadrature de Gauss-Lobatto-Legendre (GLL) :

$$\ell_i^N(\xi) = \prod_{k=1, k \neq i}^{N+1} \frac{\xi - \xi_k}{\xi_i - \xi_k}$$

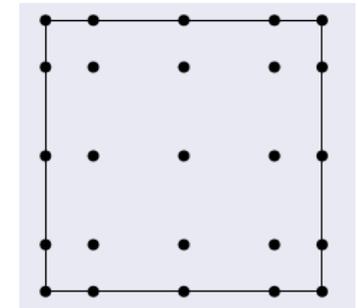
$$i = 1, 2, \dots, N+1$$

$$\xi \in [-1, 1]$$

$$\ell_i^N(\xi_j) = \delta_{ij}$$

$$u(\xi, t) = \sum_{i=1}^{N+1} u(t) \ell_i^N(\xi)$$

Points GLL



- SEM (Spectral Element Method) : propagation d'ondes en milieux (visco-) élastiques

⇒ **Pours (e.g. par rapport aux éléments finis) :**

- Méthode plus rapide (e.g. résolution explicite, matrice de masse diagonale par construction)
- Meilleure précision : 5 à 7 GLL / longueur d'onde suffisent contre 20 points en FEM
- « Facilement » parallélisable

⇒ **Contres :**

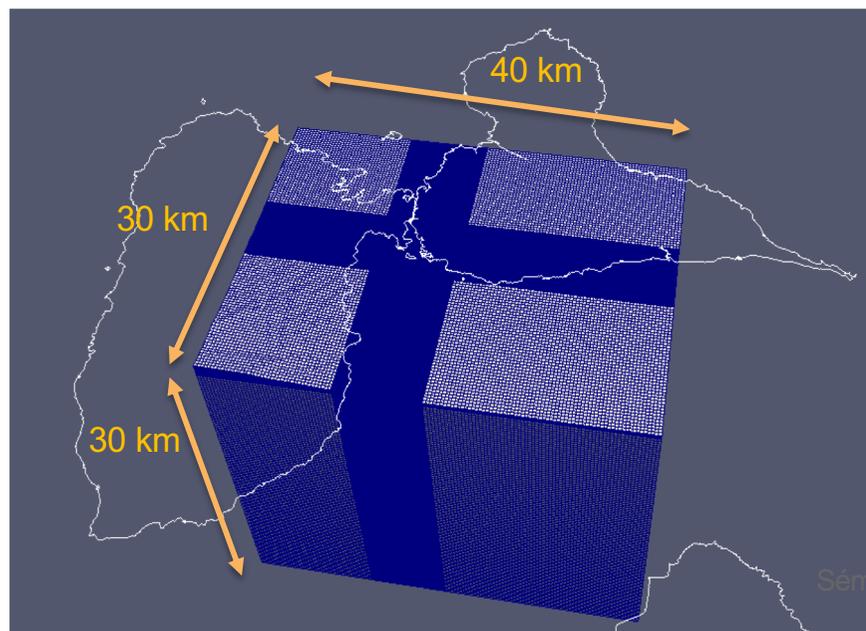
- Maillages hexaédriques seulement (sinon matrice de masse non diagonale) : incompatibles pour des géométries complexes
- Difficile d'introduire des discontinuités (failles, ...) : problème de maillage, de stabilité numérique

EXEMPLES DE SIMULATIONS LARGE ÉCHELLE

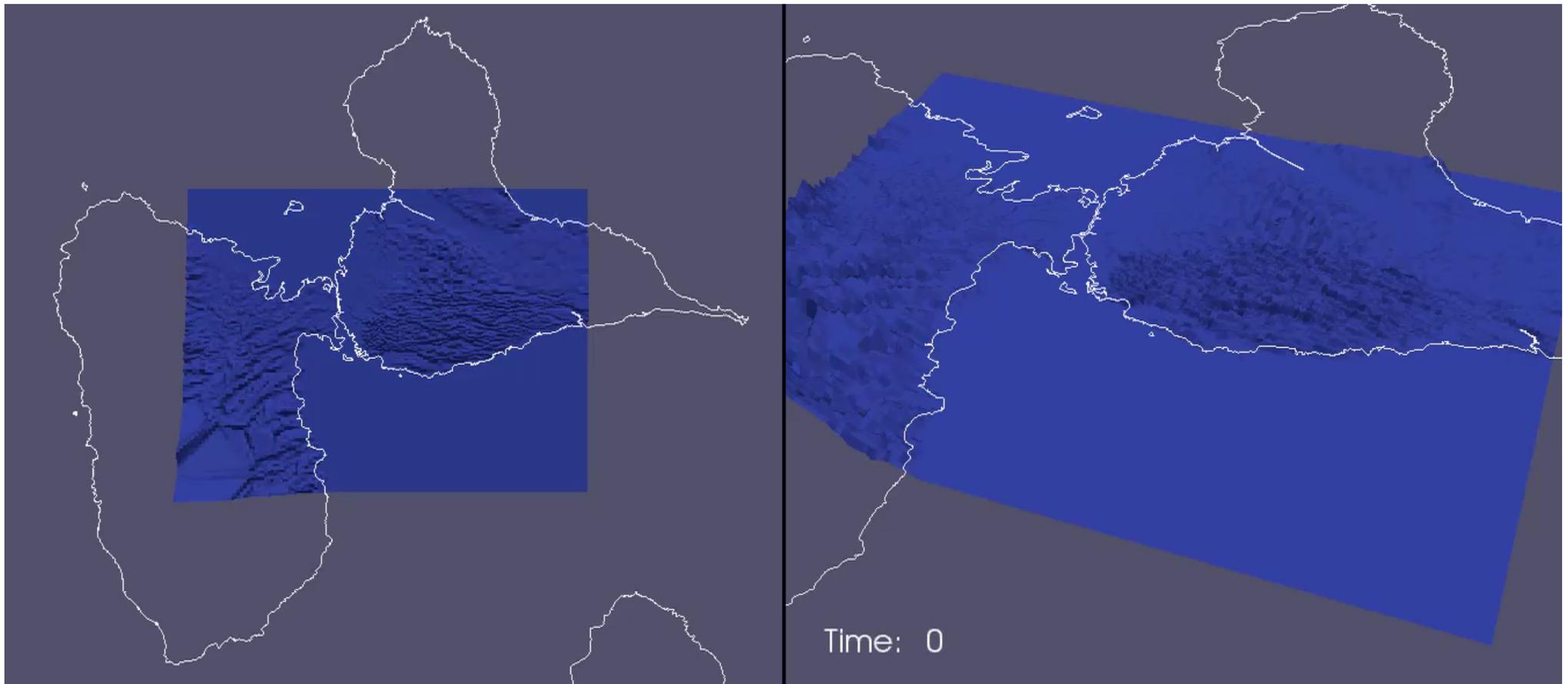
Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales :

- Δx 10m, Δz 1m : ~ 1.7 M ddl ($\sim 8,2$ M d'hexaèdres)
- Modèle viscoélastique pour toutes les formations géologiques
- Durée physique du séisme : 30 secondes ($120\,000 \Delta t$)
- Fréquence maximale : 5 Hz

⇒ **Calculs SEM avec EFISPEC3D**

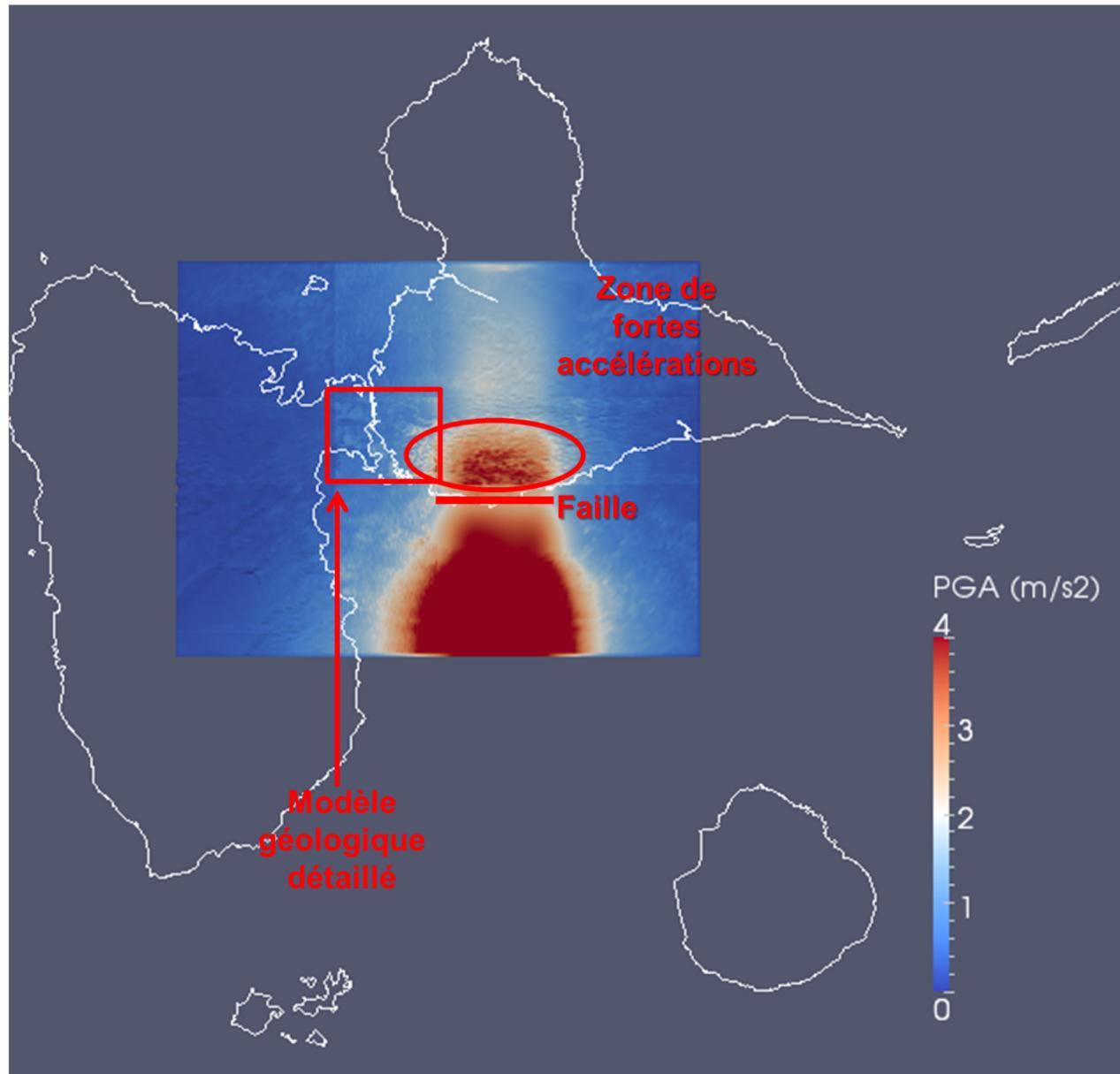


Valeur absolue de l'accélération (3 directions)



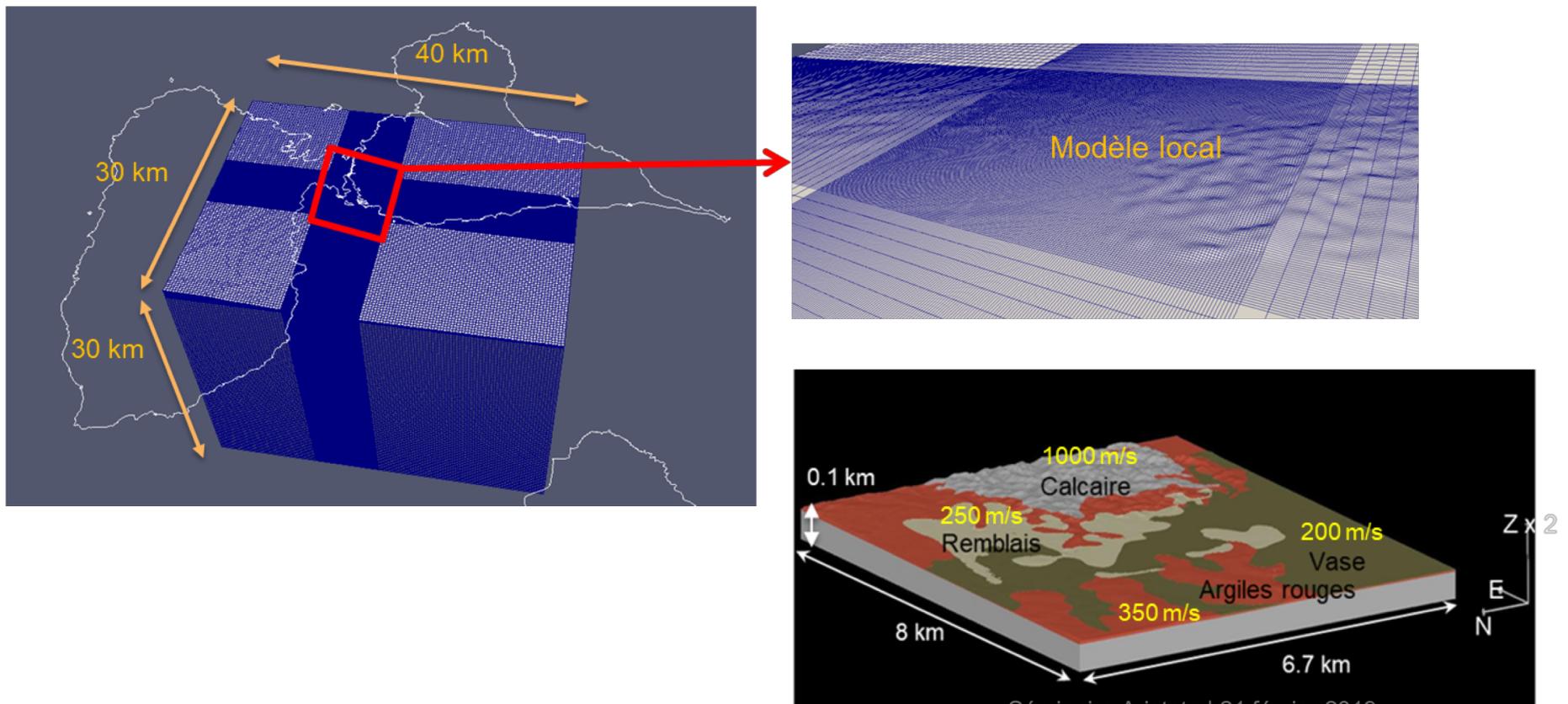
Vue de dessus

Vue isométrique



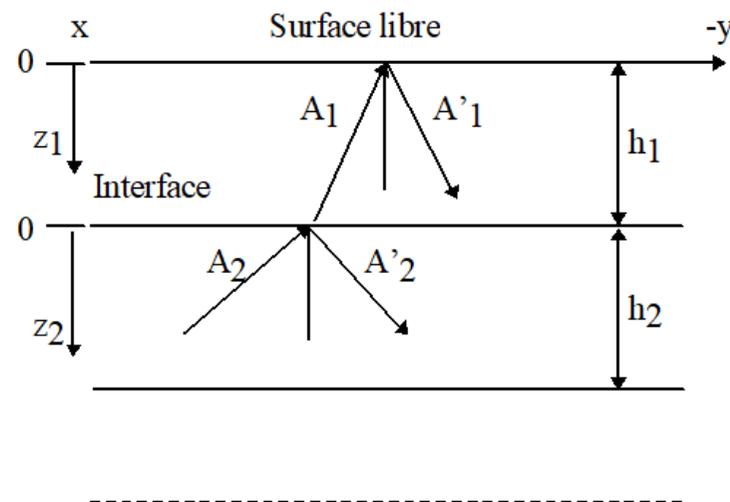
Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales :

- Création d'un modèle géologique 3D détaillé « local »

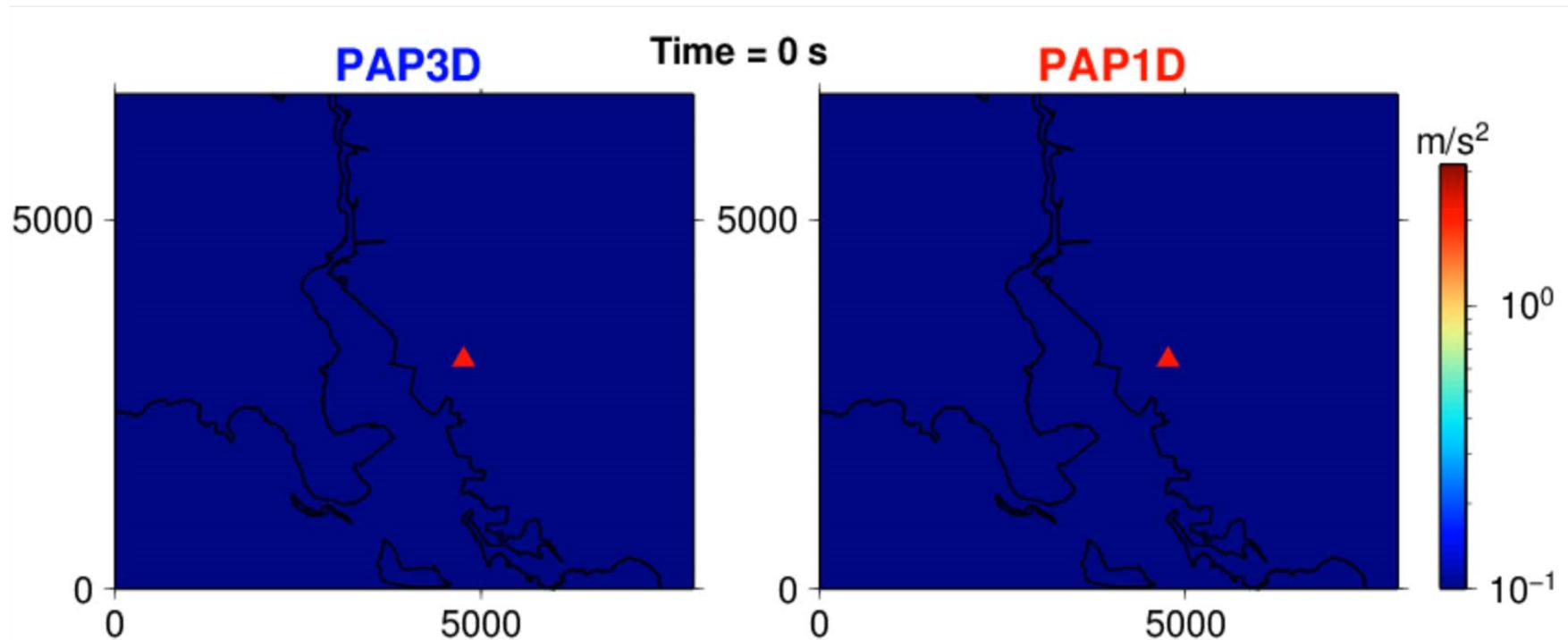


Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales :

- Création d'un modèle géologique 3D détaillé « local »
- Calculs 1D sur une grille de 5 508 colonnes de sol (Thomson-Haskell)

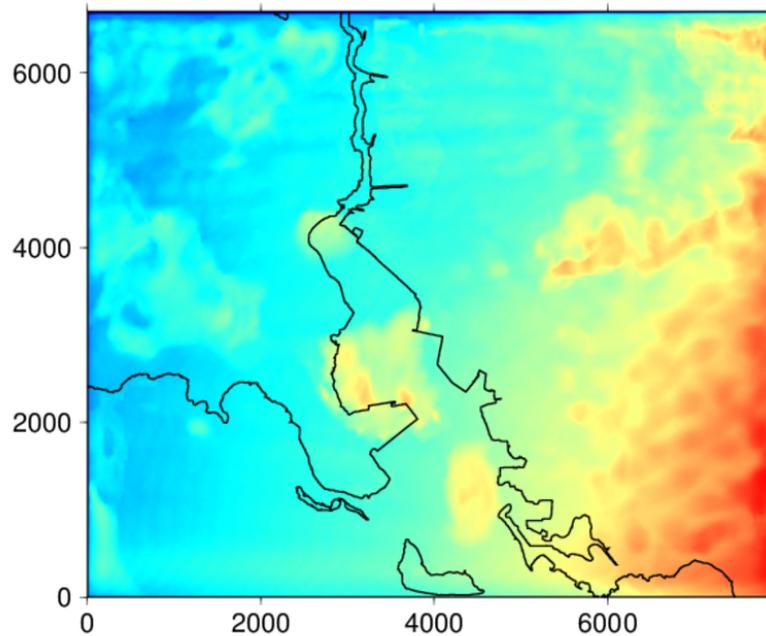


⇒ **Comparaison des simulations 1D/3D (incertitudes)**

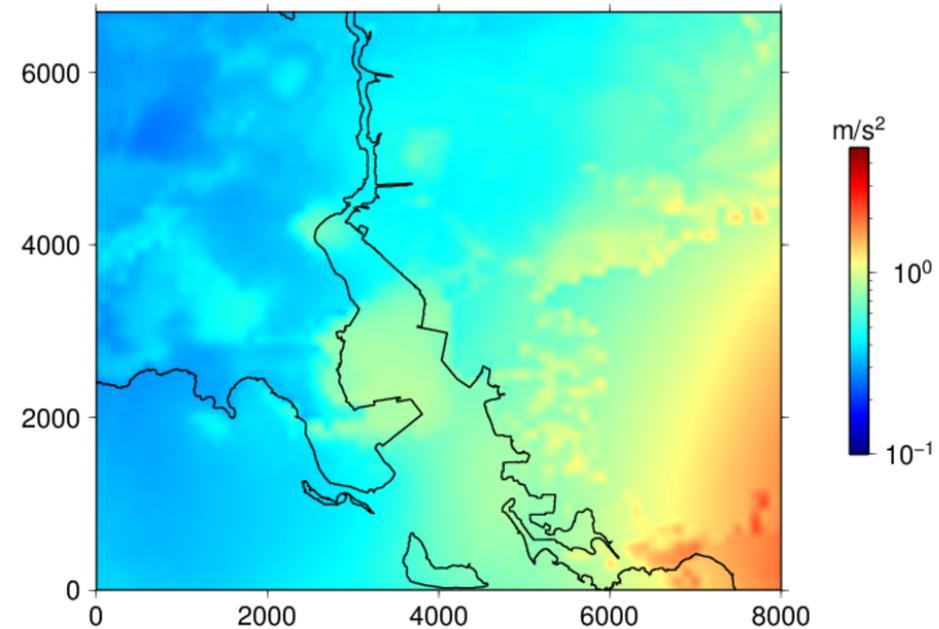


Seisme sous l'hotel de ville (▲)
Comparaison **1D** vs **3D**

PGA from 3D viscoelastic simulation
computed by 3D spectral–element method (code EFISPEC3D)



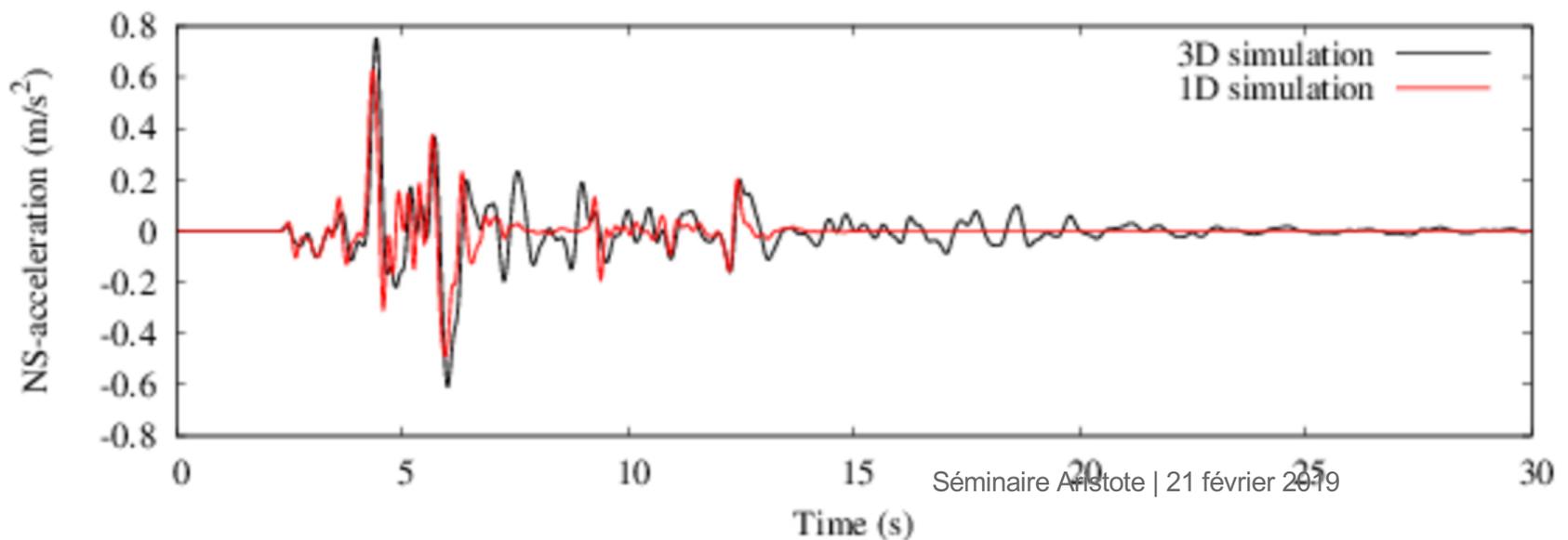
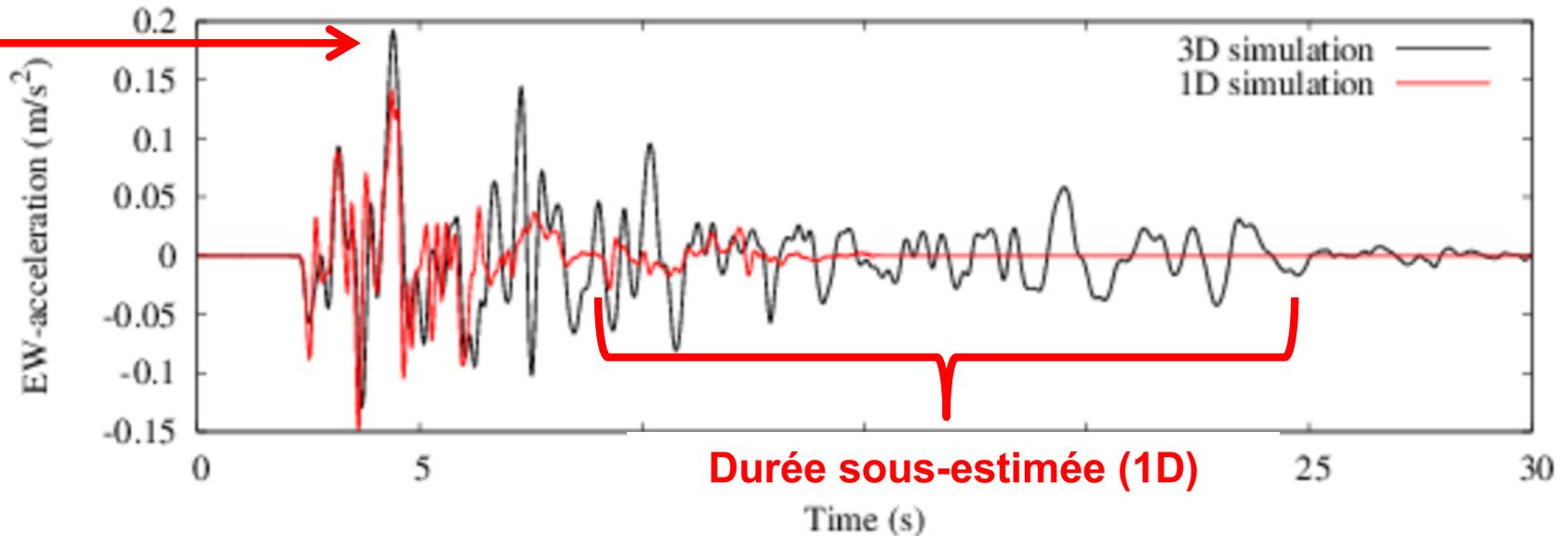
PGA from 1D viscoelastic grid simulations
computed by Thomson–Haskell propagator matrix method



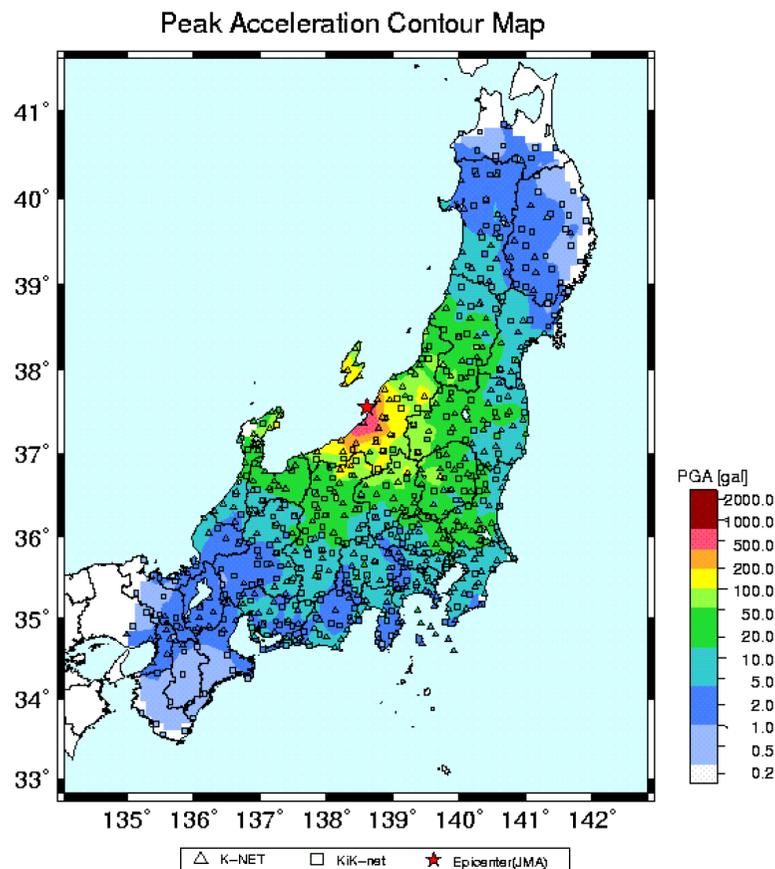
Sous-estimation des PGA par les simulations 1D

HOTEL DE VILLE DE POINTE-A-PITRE

**PGA sous
estimé d'un
facteur 1.33
(1D)**



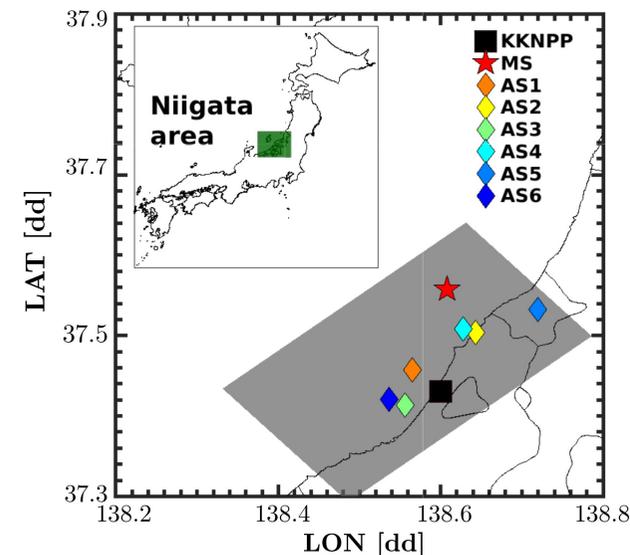
Evaluer le mouvement sismique sous le site nucléaire de Kashiwasaki-Kriwa (KK NPP) via des simulations 3D régionales :



2007/07/16-10:13 37.557N 138.608E 17km M6.8

Séisme de Niigataken-Chuetsu-Oki (16/07/07, Mw 6,6)

- Profondeur =10 Km
- Epicentre situé à 16 km du site
- De nombreuses répliques (ASi) après le choc principal (MS)



Evaluer le mouvement sismique sous le site nucléaire de Kashiwasaki-Kriwa (KK NPP) via des simulations 3D régionales :

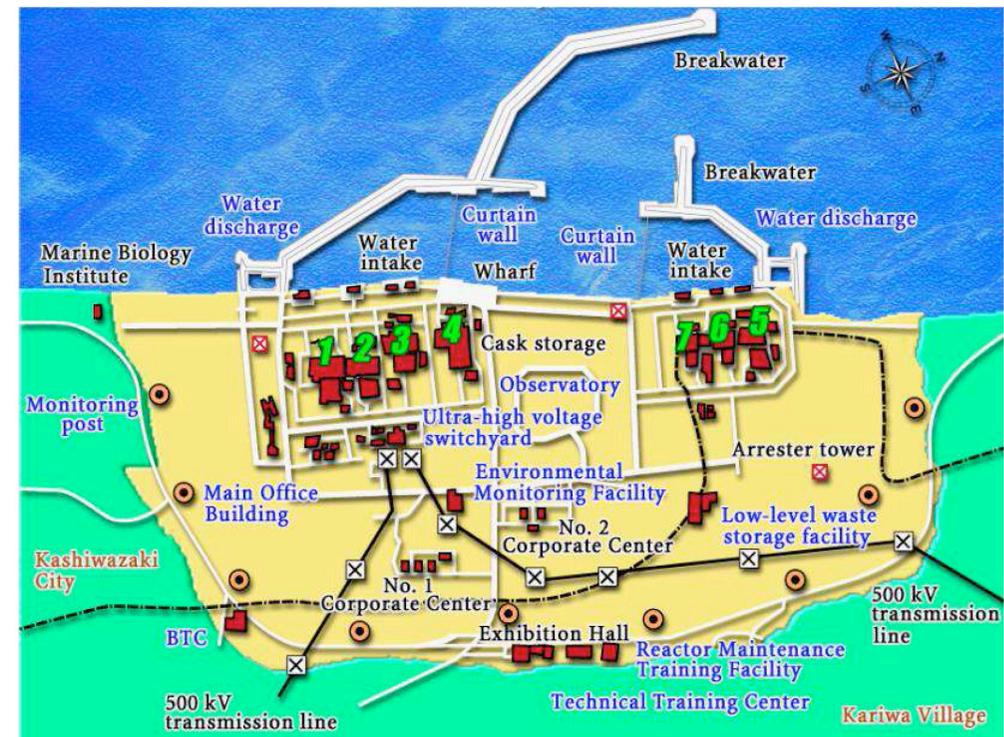
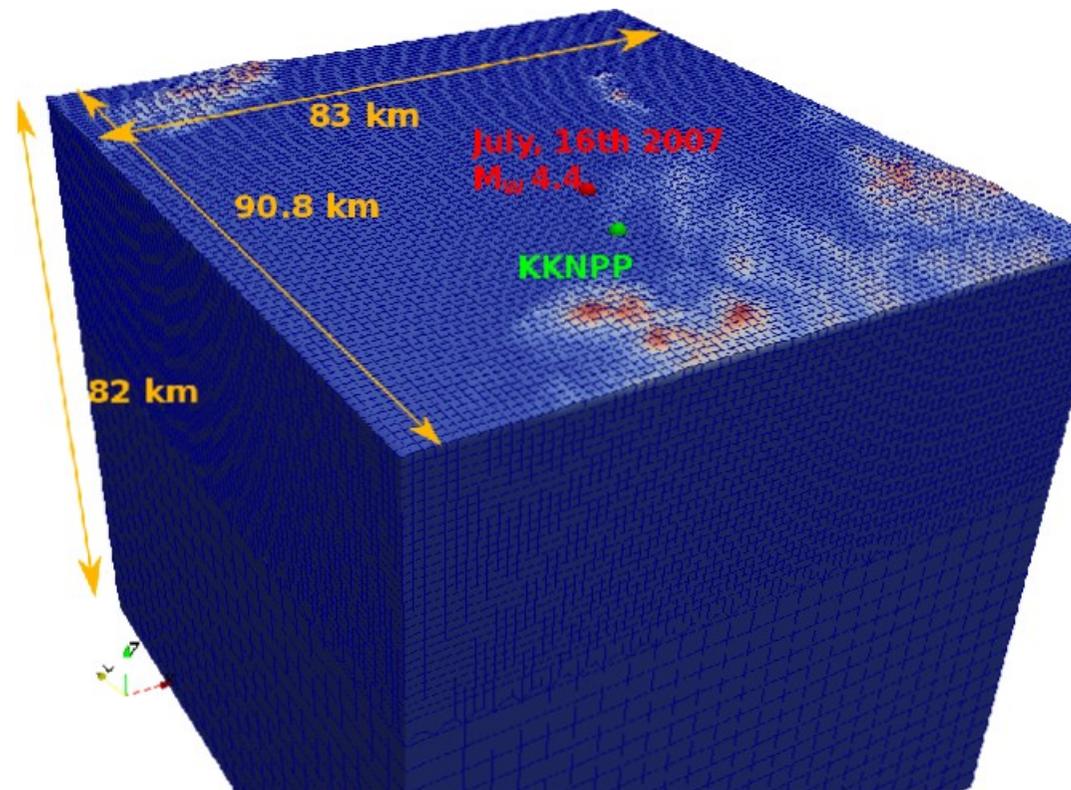


FIG. 5. Plan view of the K-K NPP site (TEPCO).

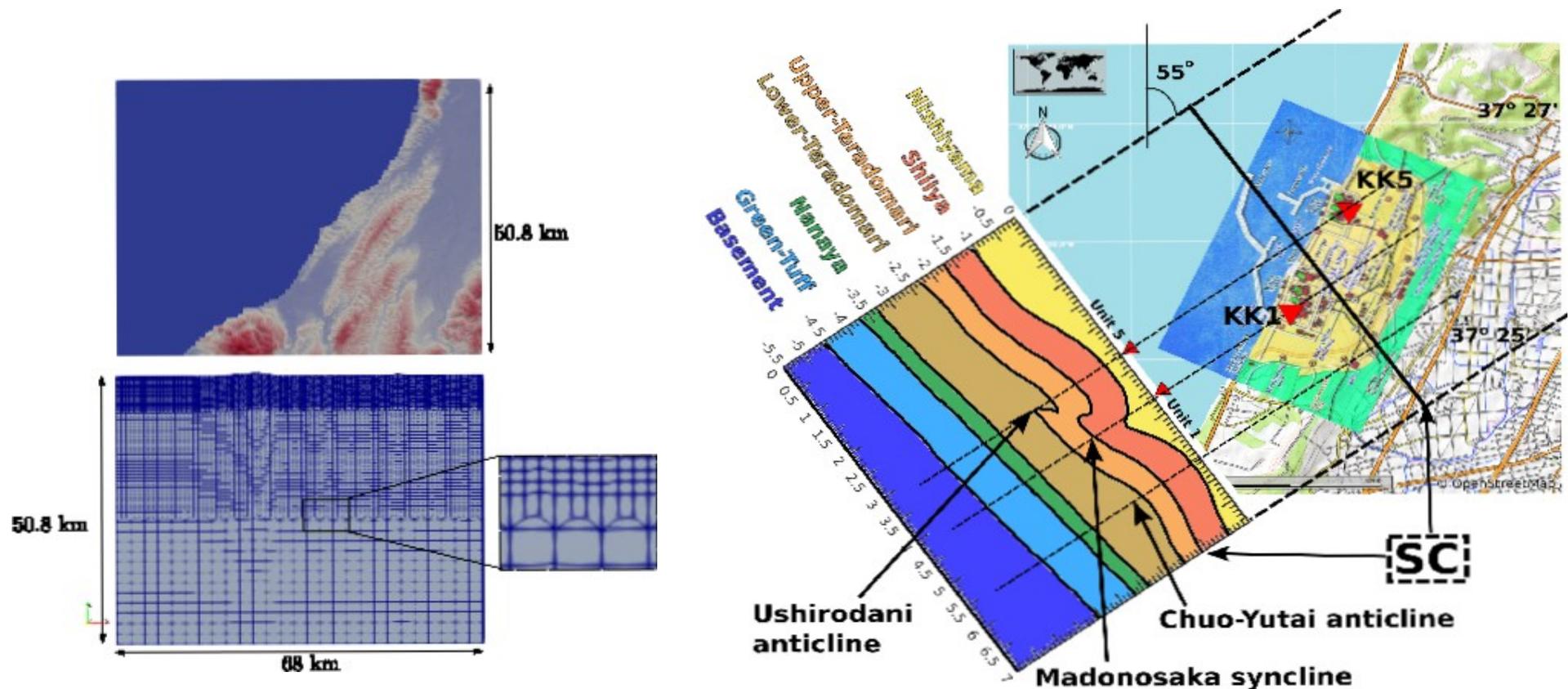
Evaluer le mouvement sismique sous le site nucléaire de Kashiwasaki-Kriwa (KK NPP) via des simulations 3D régionales :

- Modèle viscoélastique pour toutes les formations géologiques
- Fréquence maximale : ~5 Hz (7 GLL par maille)
- ~211 k éléments



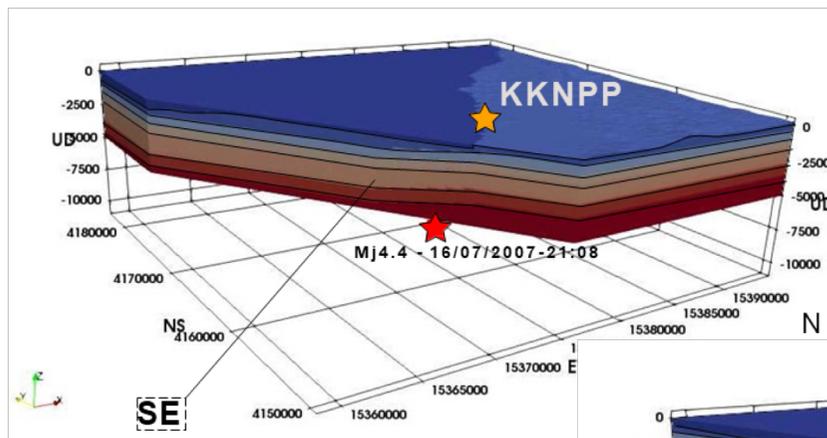
Evaluer le mouvement sismique sous le site nucléaire de Kashiwasaki-Kriwa (KK NPP) via des simulations 3D régionales :

- Couplage du modèle régional avec un modèle géologique local détaillé

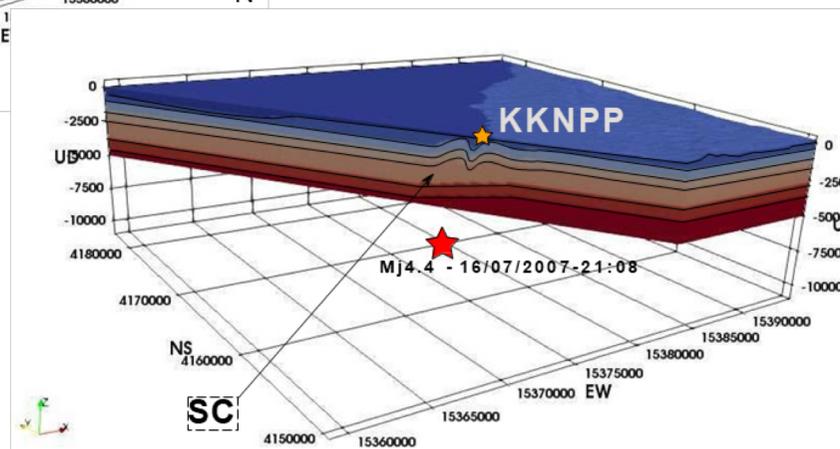


Evaluer le mouvement sismique sous le site nucléaire de Kashiwasaki-Kriwa (KK NPP) via des simulations 3D régionales :

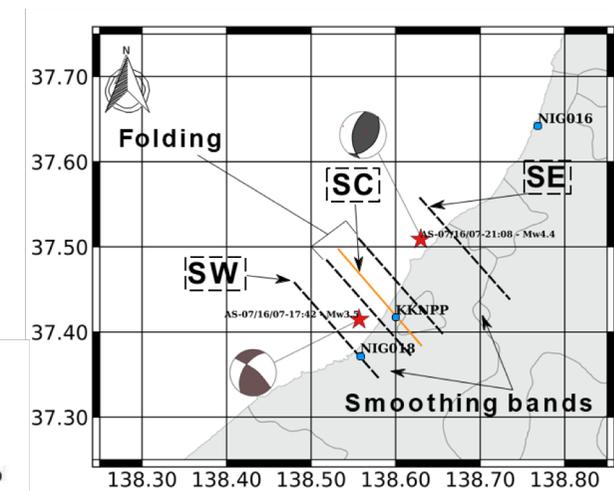
- Couplage du modèle régional avec un modèle géologique local détaillé
 ⇒ **Calculs avec SEM3D** (12h sur FUSION, 192 cœurs) et analyse de l'impact de la prise en compte de la complexité géologique (plis)

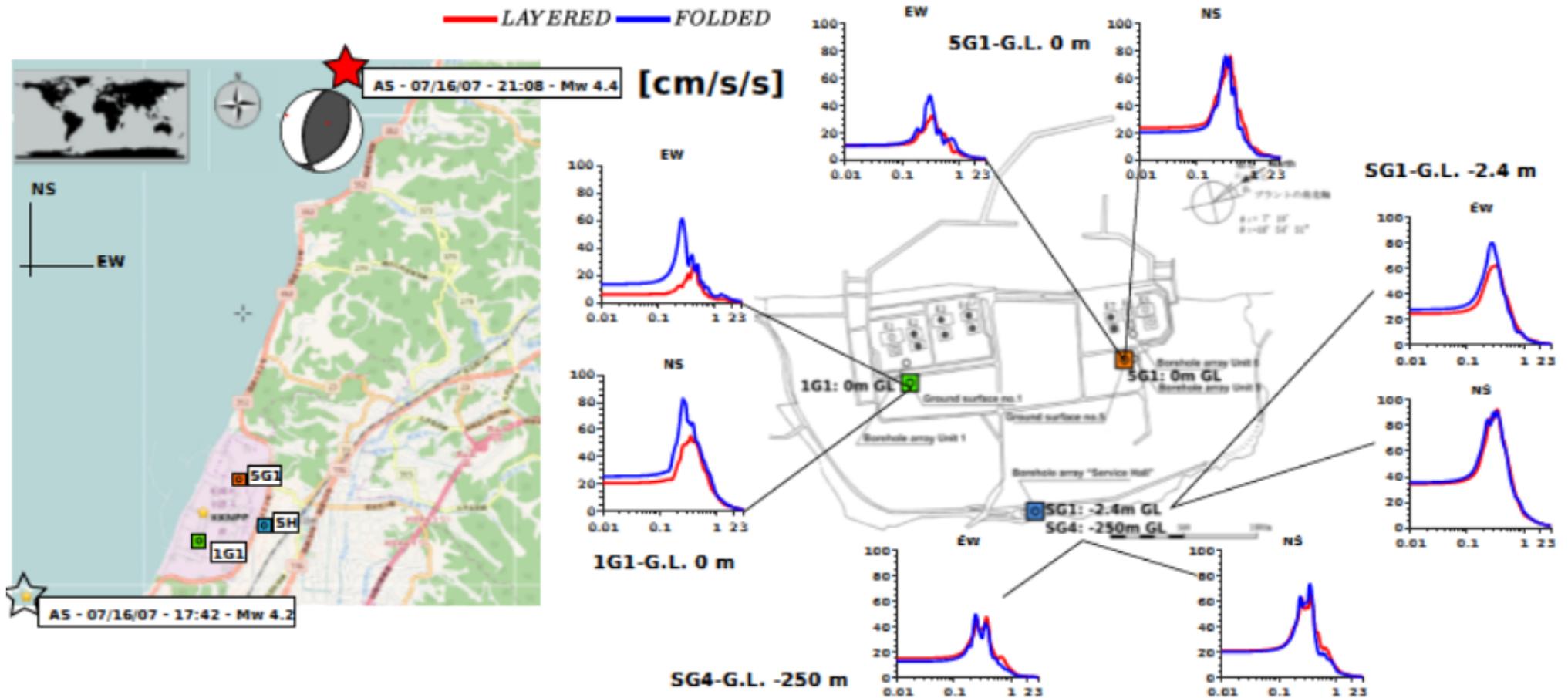


(a)

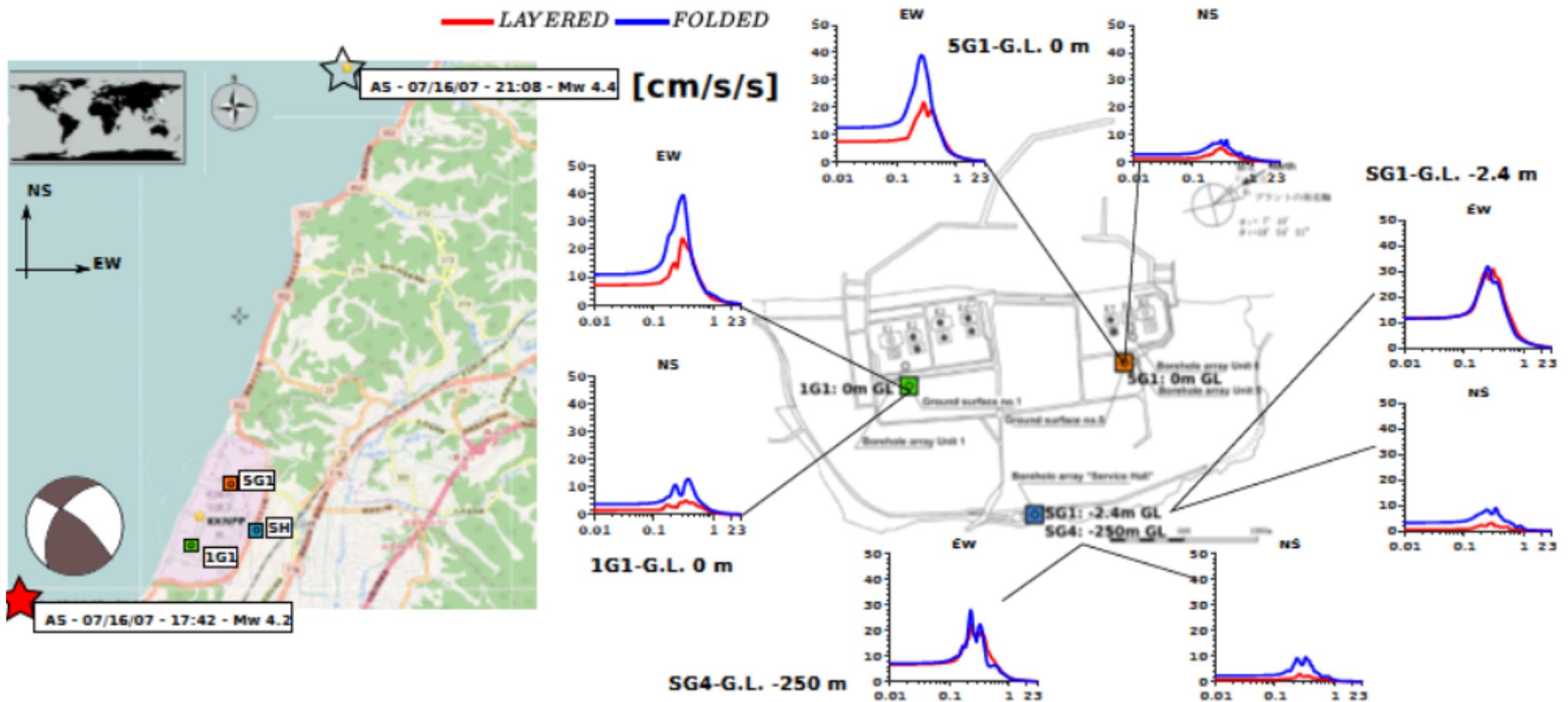


(b)



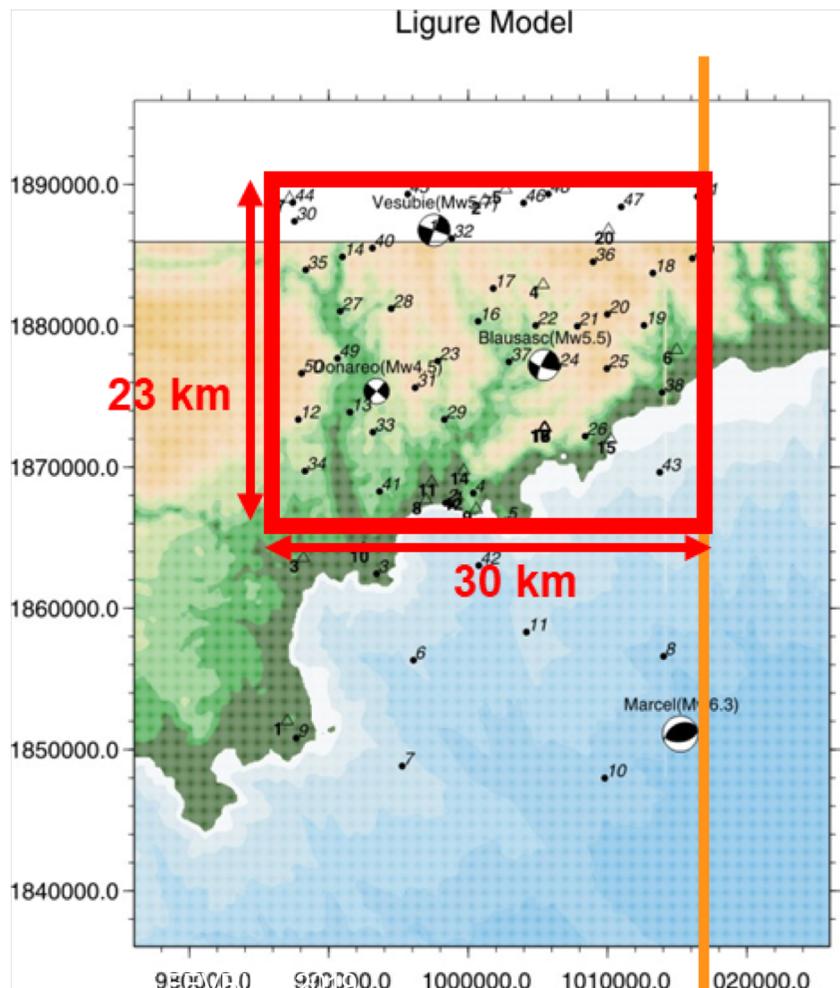


LAYERED vs FOLDED

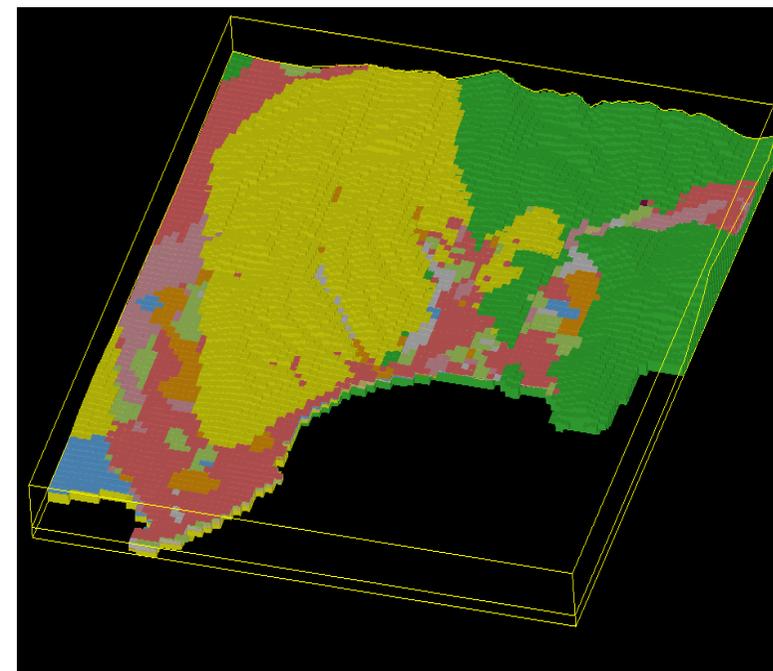


LAYERED vs FOLDED

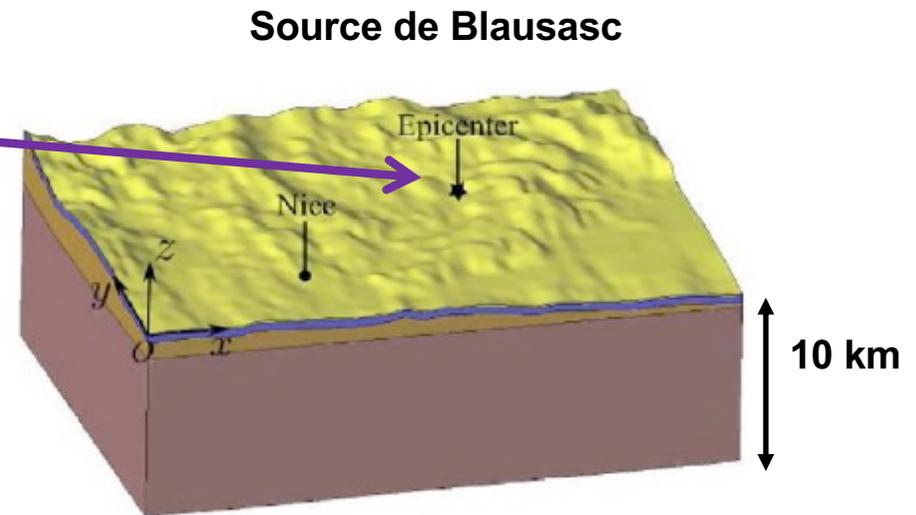
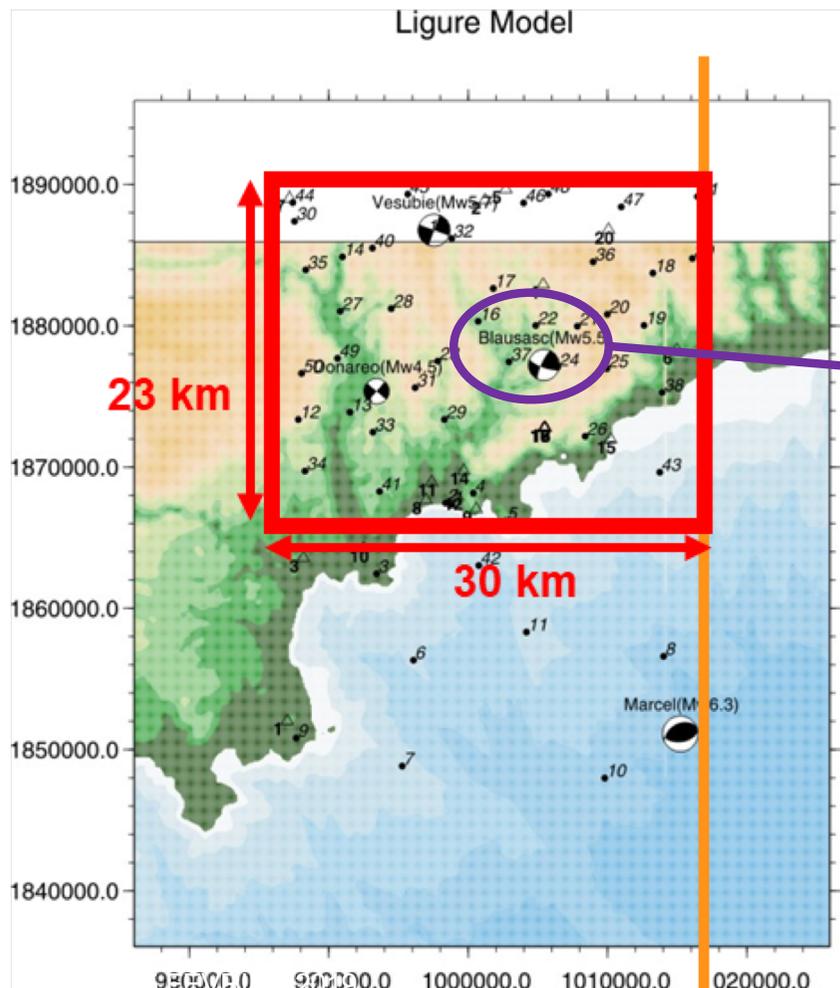
Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales non linéaires :



Geological unit	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Density (kg/m ³)	Thickness (m)	Δz (m)
Sediments	595	300	1800	100	16
Engineering bedrock	1385	800	2000	400	100
Seismological bedrock 1	2598	1500	2100	900	225
Seismological bedrock 2	4330	2500	2200	8600	480



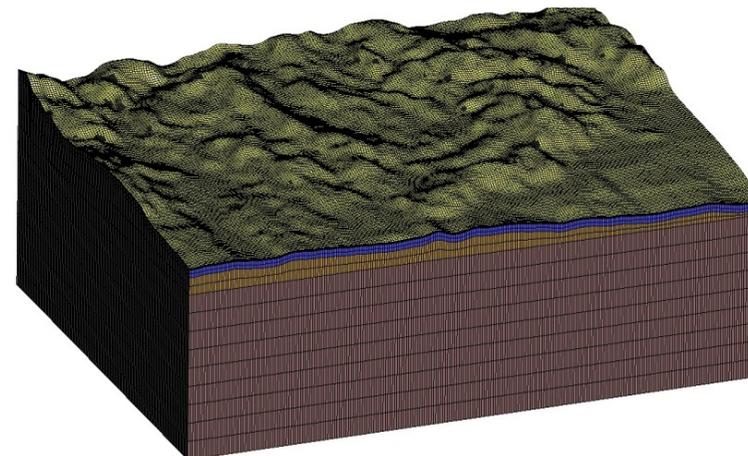
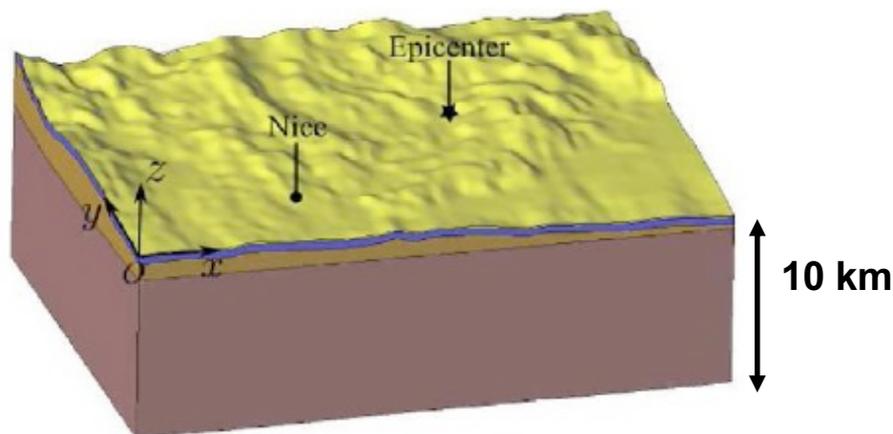
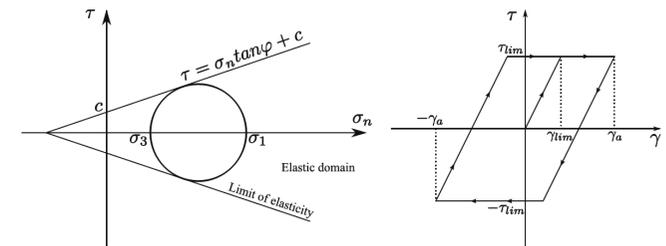
Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales non linéaires :



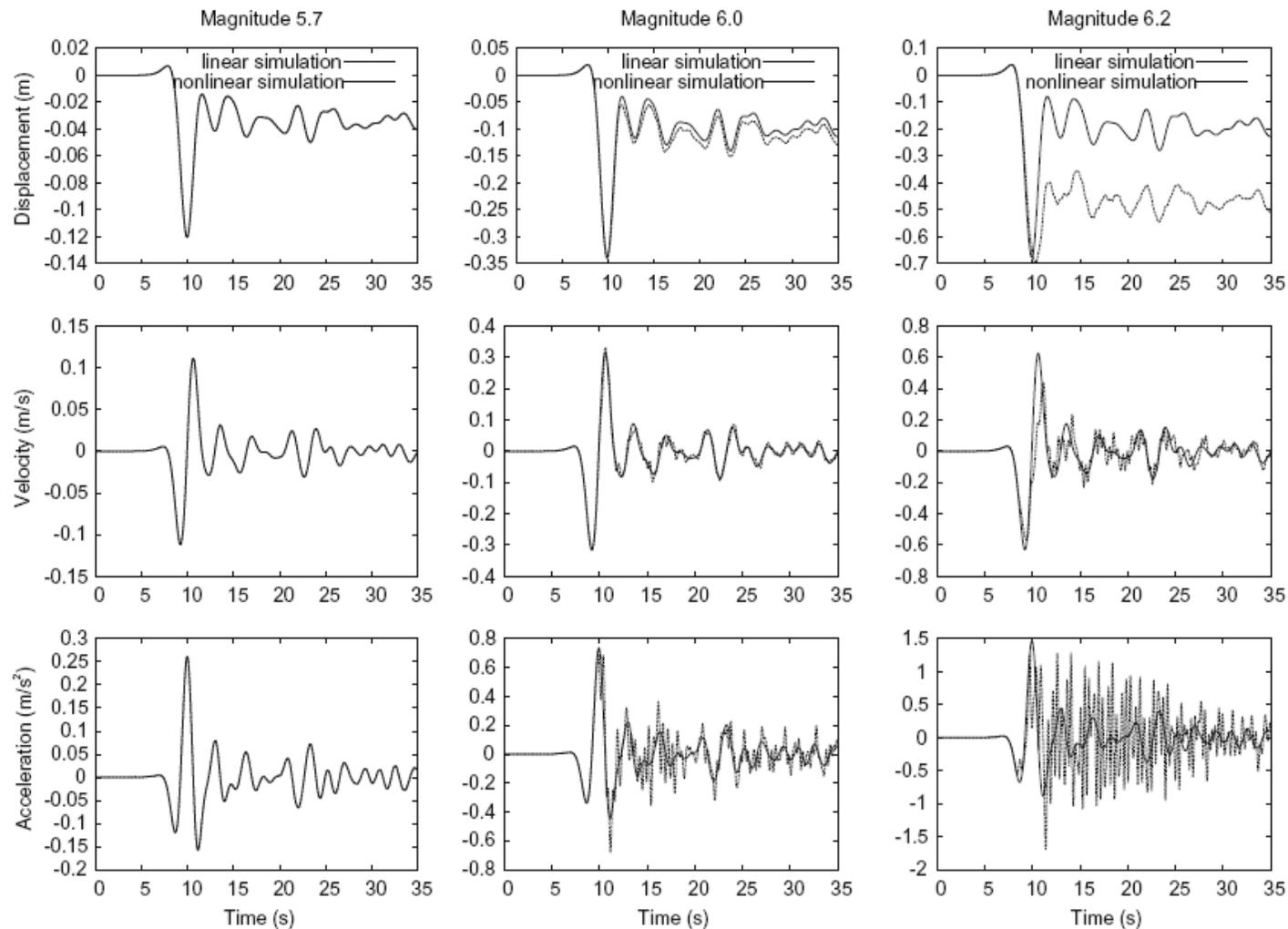
Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales non linéaires :

- $\Delta x = \Delta y = 60\text{m}$, Δz variable : ~ 18 M dds (~ 5.8 M hexaèdres, ~ 245 k quadrangles pour les éléments de frontière absorbante)
- Modèle élastoplastique de Mohr-Coulomb pour les sédiments et élastiques pour les autres formations
- Résolution itérative implicite (Newton-Raphson modifié)
- Fréquence maximale : 1 Hz

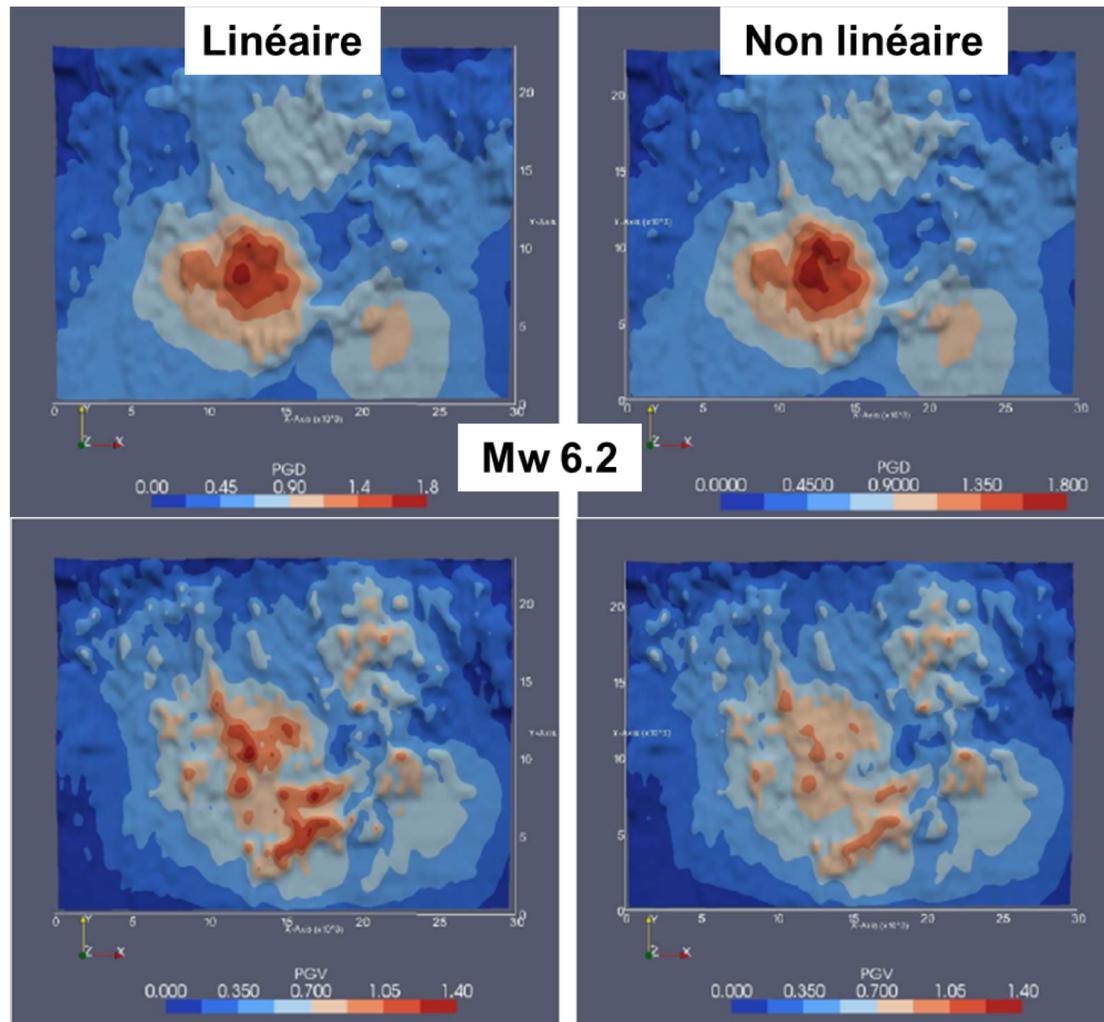
⇒ **Calculs FEM avec GefDyn**



Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales non linéaires :



Evaluer le mouvement sismique sous des enjeux ciblés (ville) via des simulations 3D régionales non linéaires :



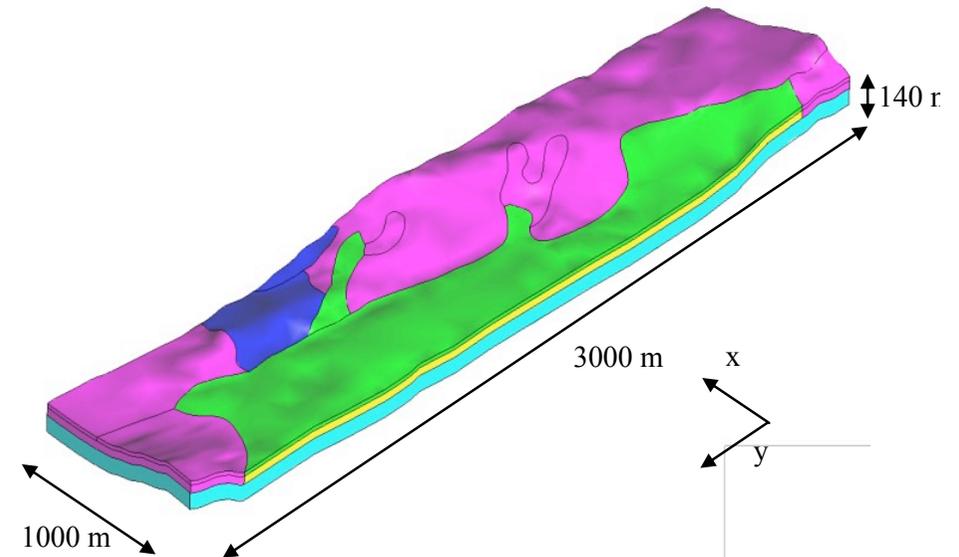
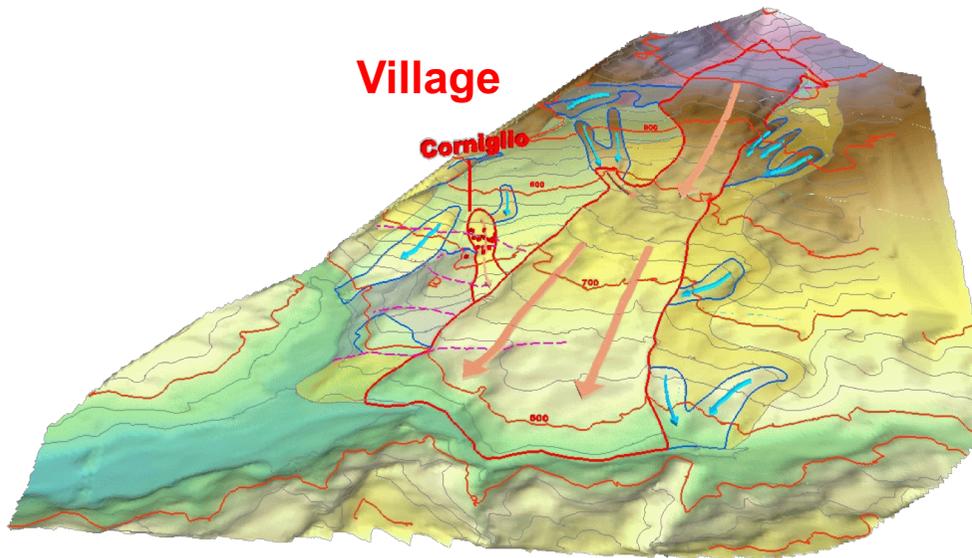
Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement via différentes méthodes de simulation :



Caractéristiques du glissement :

- Lame de 3 700m de long, 1 310m de large et 140m de profondeur,
- Observations : augmentation des déplacements en fonction du temps
- Différents scénarii à analyser :
 - ⇒ **séisme** de Correggio (Oct.1996)
 - ⇒ **pluies intenses** (Nov. 1996)

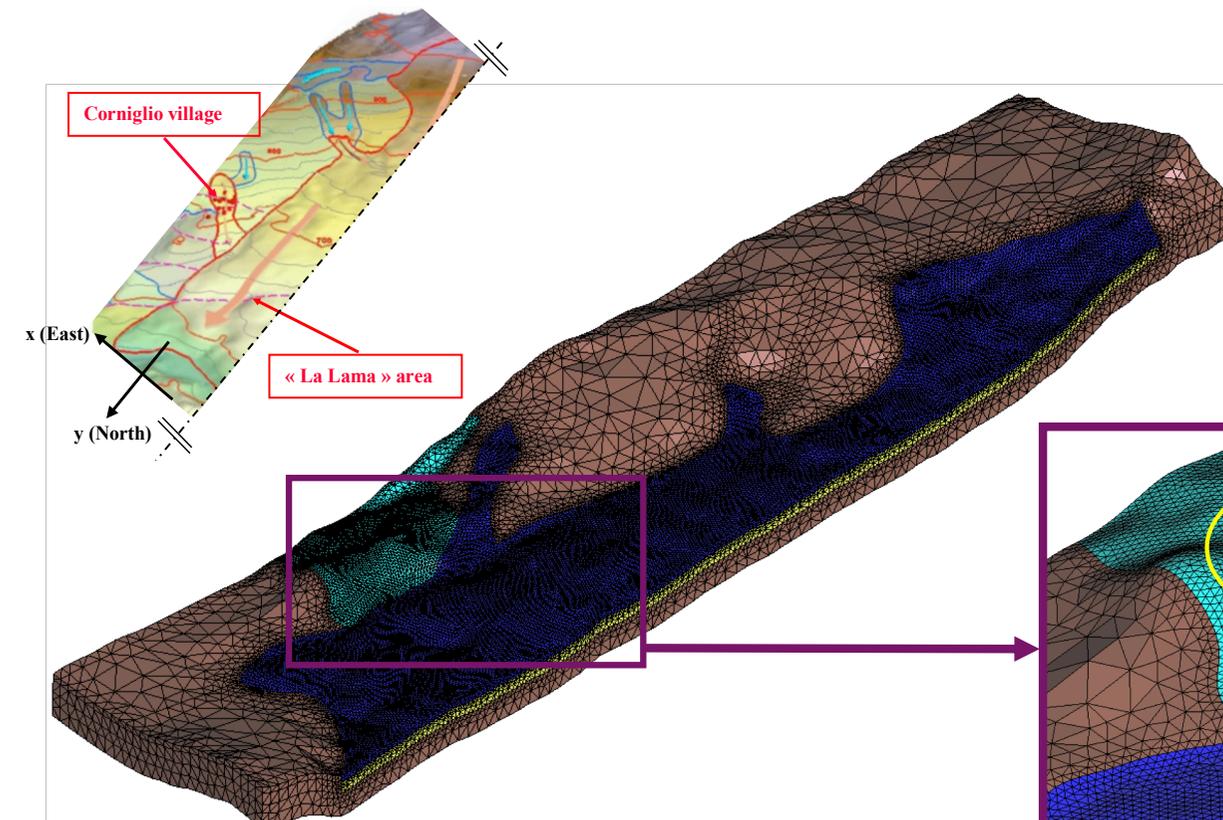
Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement via différentes méthodes de simulation :



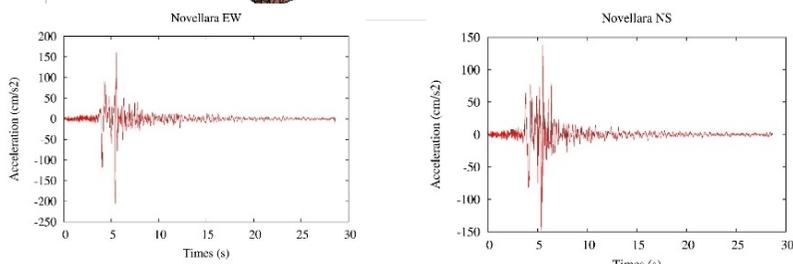
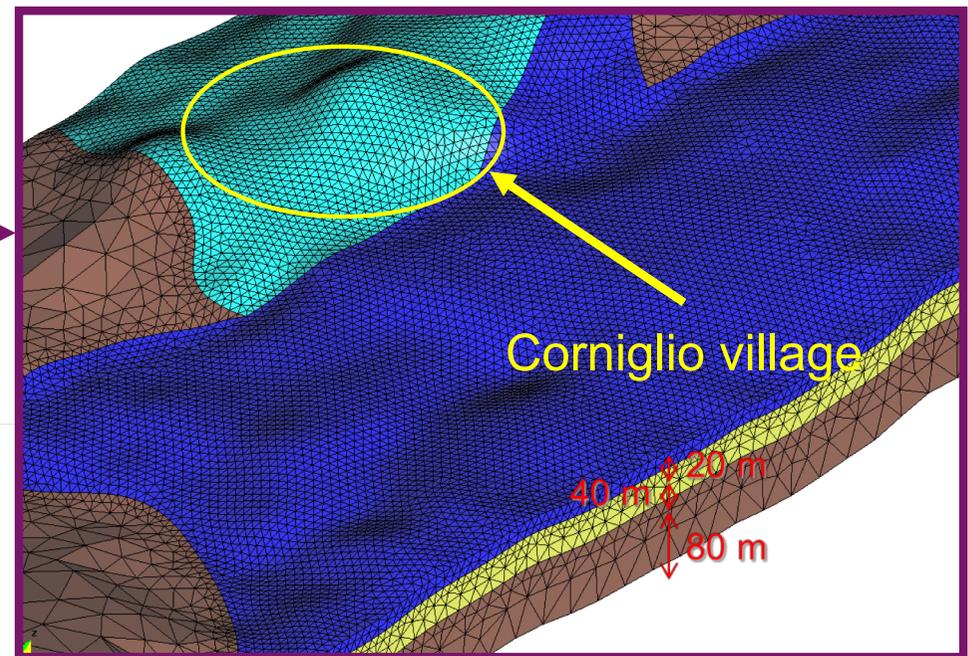
Layer	Friction Angle (°)	Cohesion (MPa)
Bedrock	-	Elastic
La Lama & Corniglio	35	25

Layer	Color	G (MPa)	K (MPa)	γ (kN)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Hydraulic Conductivity (ms ⁻¹)	Constitutive Model
Bedrock	Cyan - pink	4 000	5 000	25	2033	1264	impervious	Elastic
La Lama & Corniglio	Green - Yellow - dark blue	90	120	20	305	187	10 ⁻⁵	Mohr Coulomb

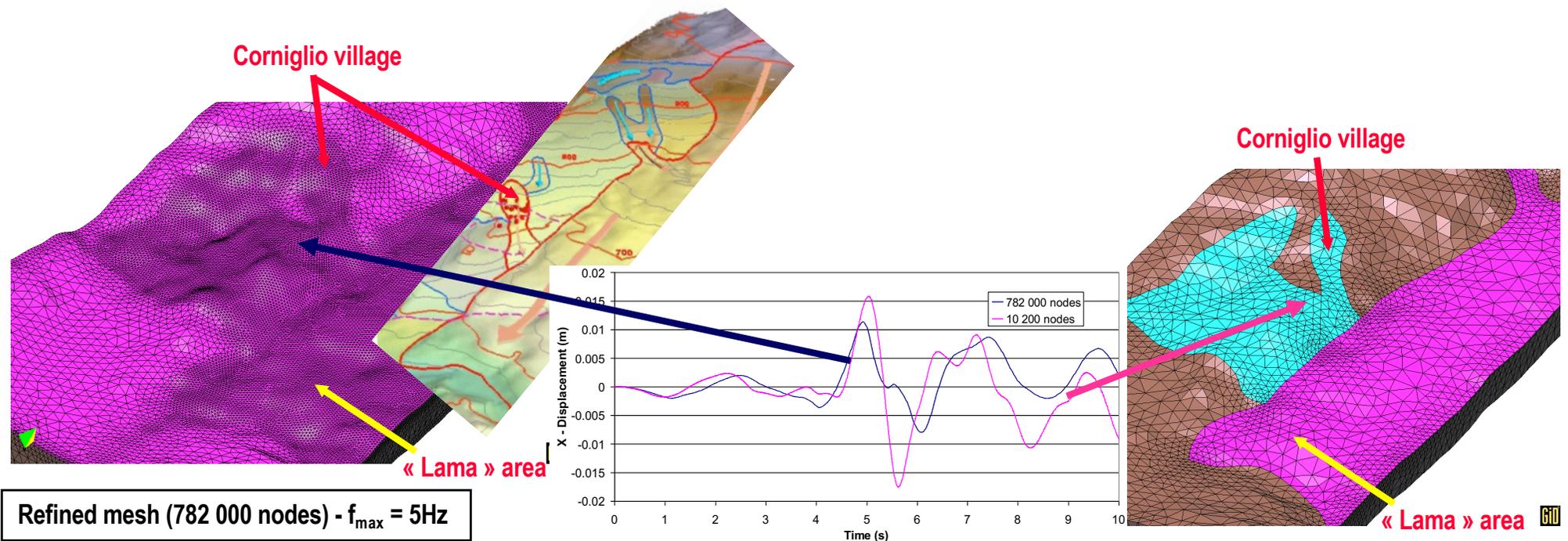
Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement :
simulations sismiques (FEM, GefDyn)



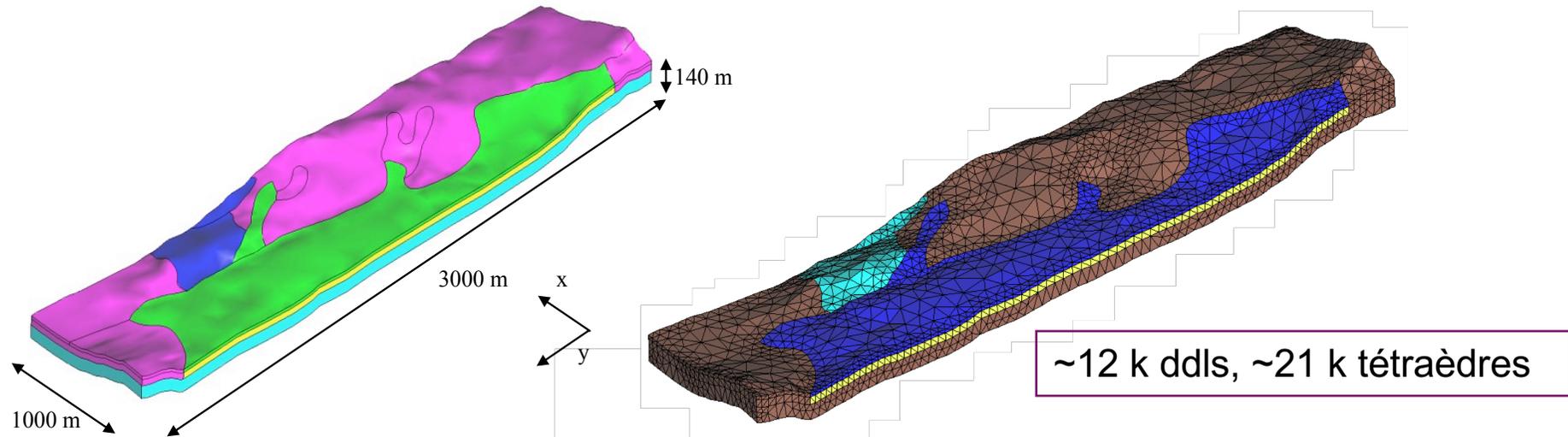
Fréquence max : 2-3 Hz
~140 k ddls, ~219 k tétraèdres



Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement : simulations sismiques (FEM, GefDyn, sans eau)

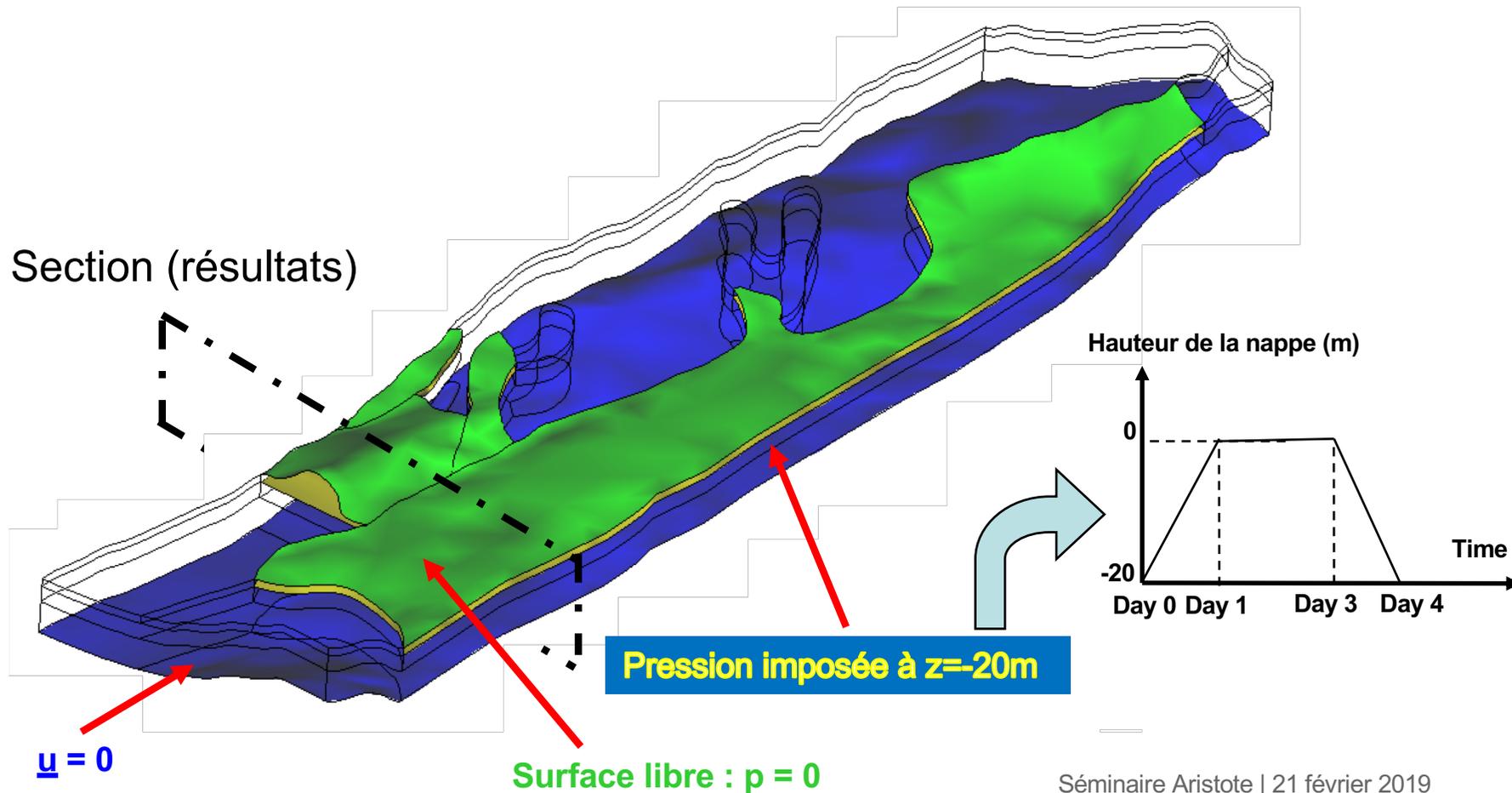


Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement : simulations statiques viscoélastiques (FEM, GefDyn, avec eau)

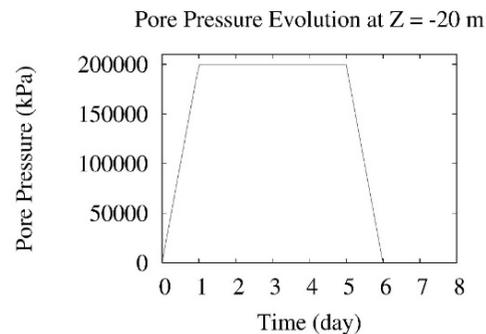
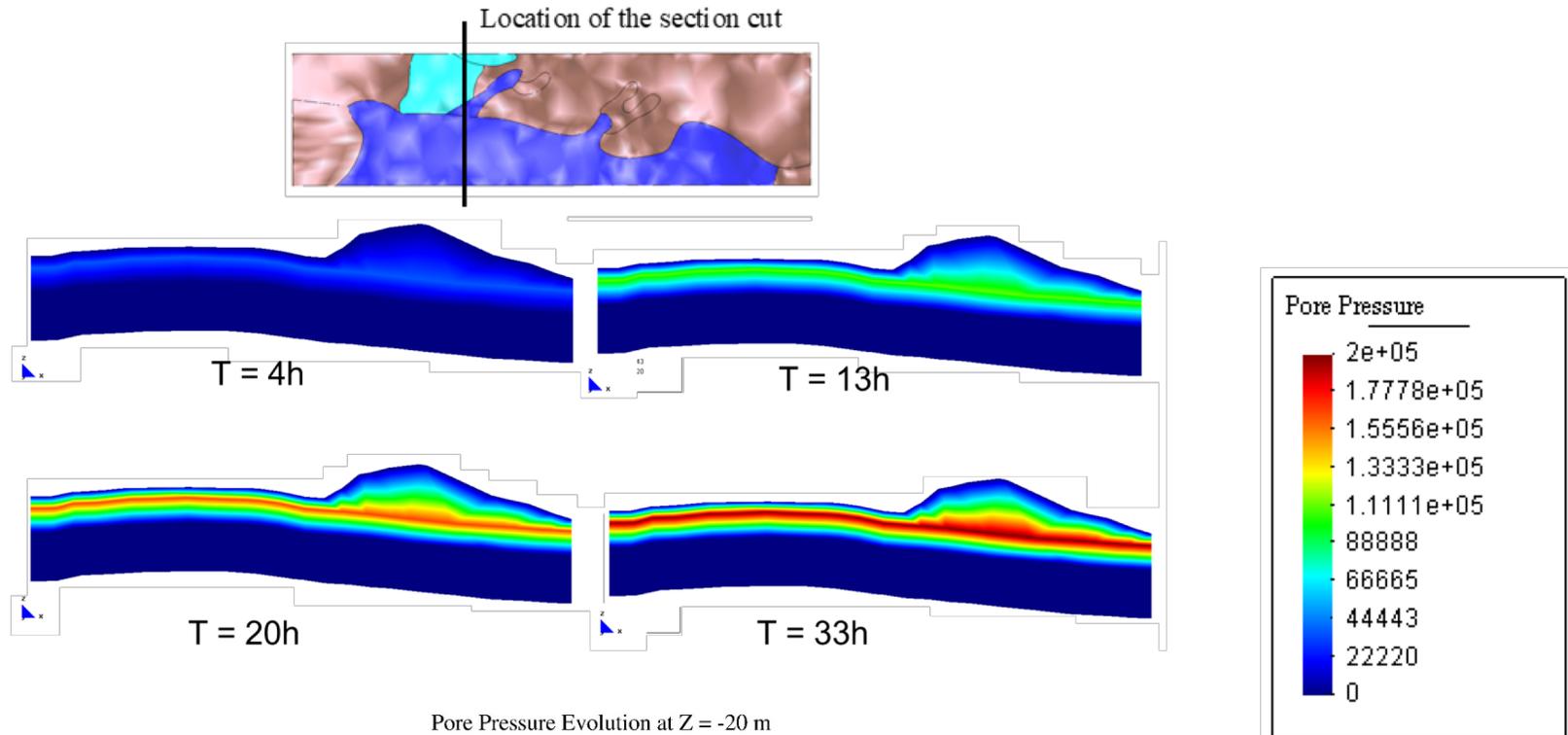


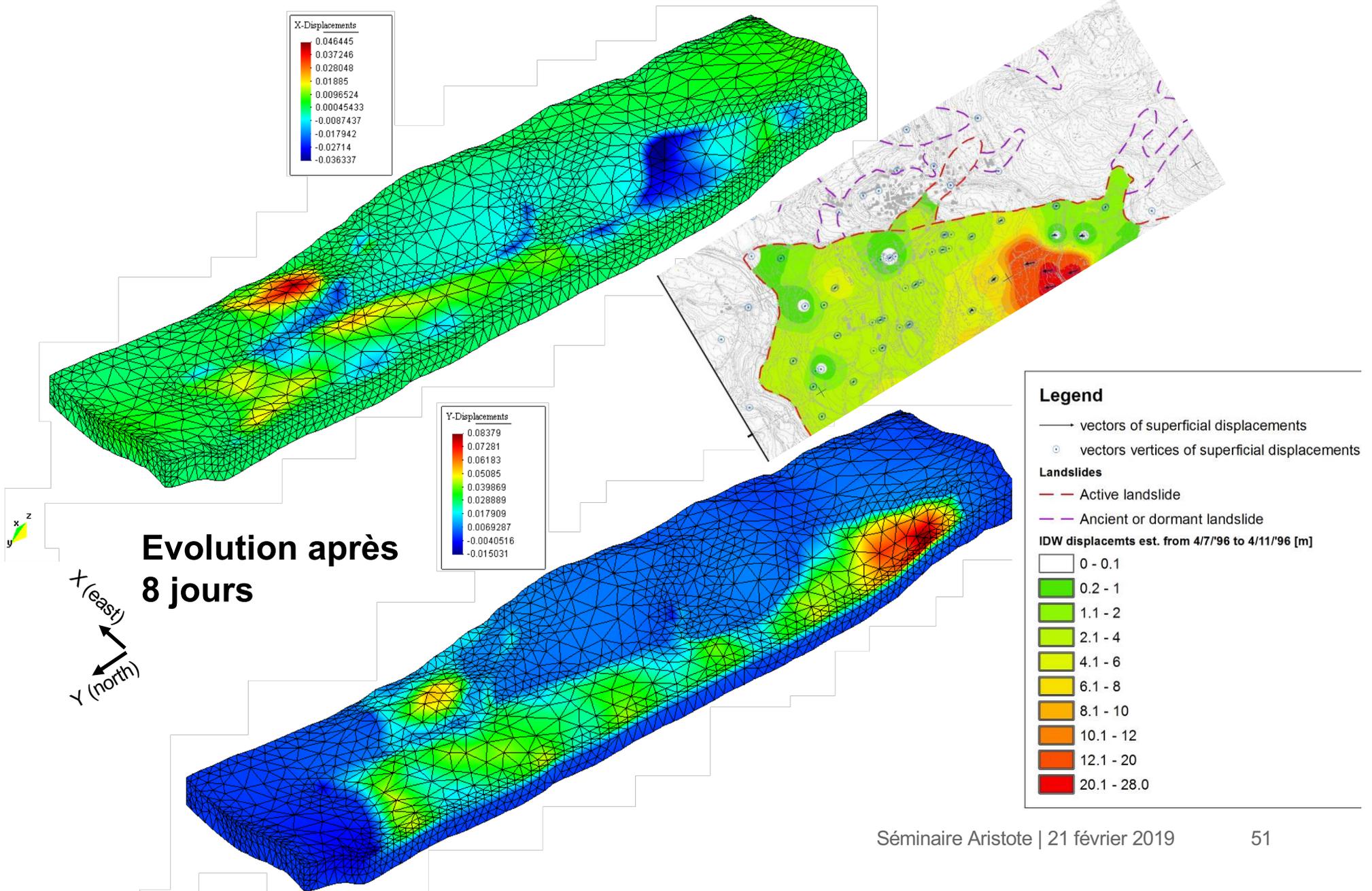
Layer	Unit weight (kN/m ³)	Shear Modulus (kPa)	Viscosity (kPa.s)	Poisson ratio	Hydraulic Conductivity (m/s)	Constitutive model
La Lama (green layer)	20	10 ³	10 ⁷	0.3	10 ⁻⁵	Kelvin-Voigt
La Lama (yellow layer)	20	10 ³	10 ⁷	0.3	Impervious	Kelvin-Voigt
Corniglio	20	6 x 10 ³	10 ⁷	0.3	10 ⁻⁵	Kelvin-Voigt
Bedrock (cyan & pink layer)	25	3.64 x 10 ⁶	-	0.184	Impervious	Elastic

Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement :
simulations statiques viscoélastiques (FEM, GefDyn, avec eau)



Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement : simulations statiques viscoélastiques (FEM, GefDyn, avec eau)





Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement : simulations statiques viscoplastiques (approche St Venant)

- Ecoulement gravitaire d'une couche fluide équivalente (épaisseur ~20m)
- Formulation eulérienne avec résolution sur une grille FEM 2D (topographie)

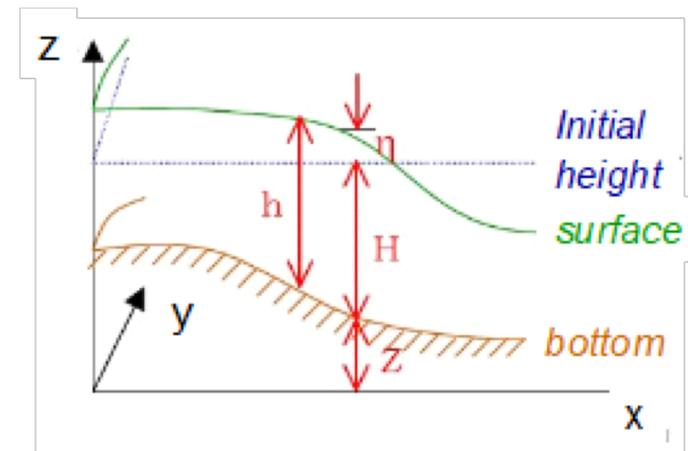
$$h \cdot \bar{v}_i \Big|_{(x,y,t)} = \int_{z(B)}^{z+h(S)} v_i(x, y, \zeta, t) d\zeta \quad i \in \{x, y\}$$

$$\partial_t h + \partial_{x_j} (h \cdot \bar{v}_j) = 0 \quad (i, j) \in \{x, y\}$$

$$\rho \partial_t (h \cdot \bar{v}_j) + \rho \partial_{x_j} (h \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{v}_j) = \rho b_i h + \partial_{x_j} (h \cdot \bar{\sigma}_{ij}) + t_i^S + t_i^B$$

$$t_i^S = \sigma_{ij} \cdot n_j \Big|_{z+h}, \quad t_i^B = \sigma_{ij} \cdot n_j \Big|_z$$

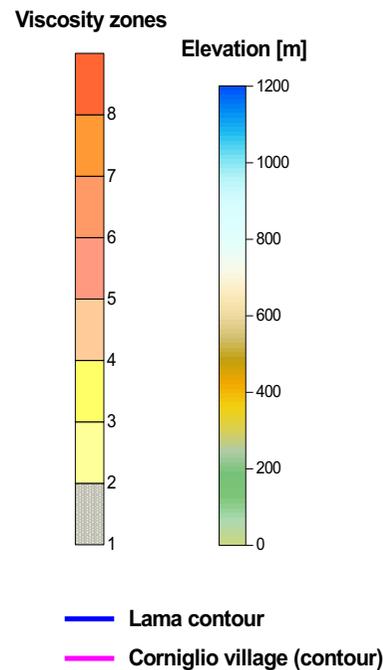
$$h = h(x, y, t) = S(x, y, t) - B(x, y, t)$$



Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement : simulations statiques viscoplastiques (approche St Venant)

- Viscosités et vitesses initiales obtenues à partir des déplacements observés entre le 4/07/96 et le 4/11/96

Contours of viscosities used for the St Venant approach



Comprendre les mécanismes et évaluer l'ampleur du glissement : simulations statiques viscoplastiques (approche St Venant)

- Modèle de friction de Coulomb à la base de la couche fluide avec prise en compte de l'évolution de la pression interstitielle

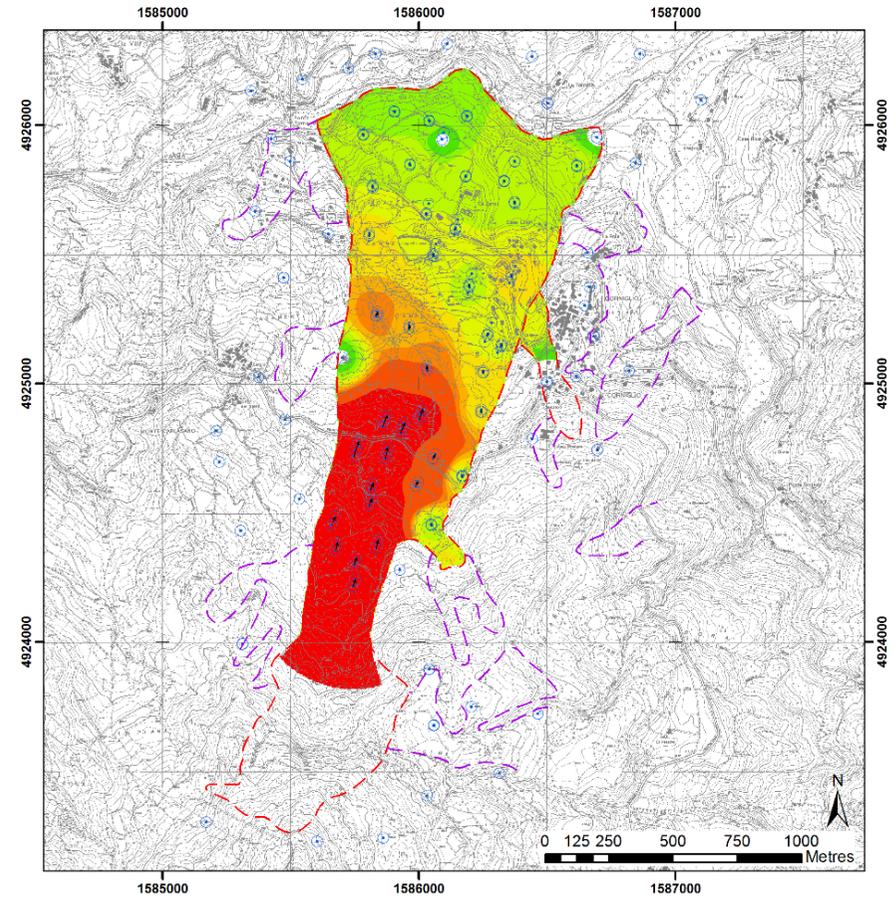
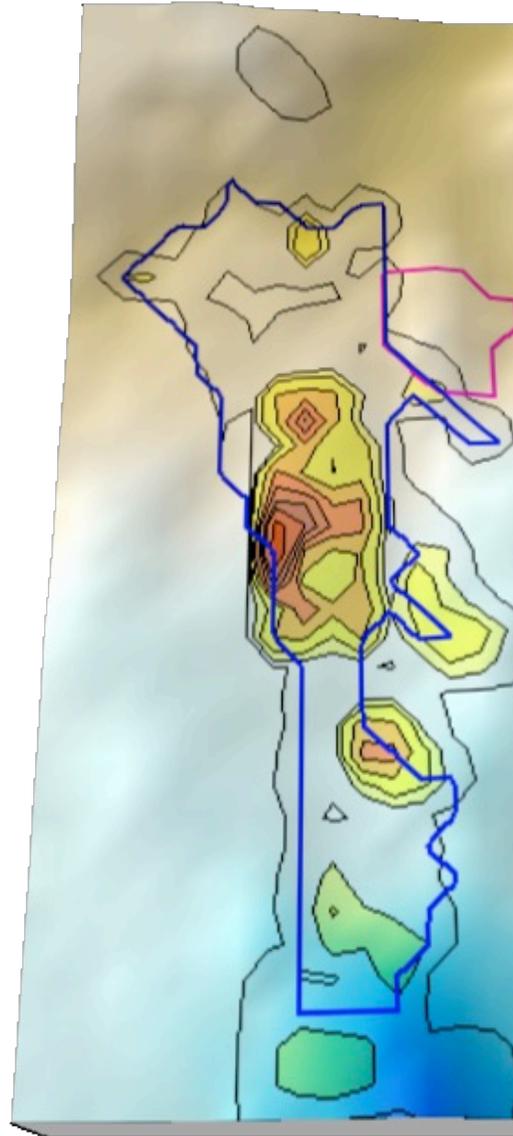
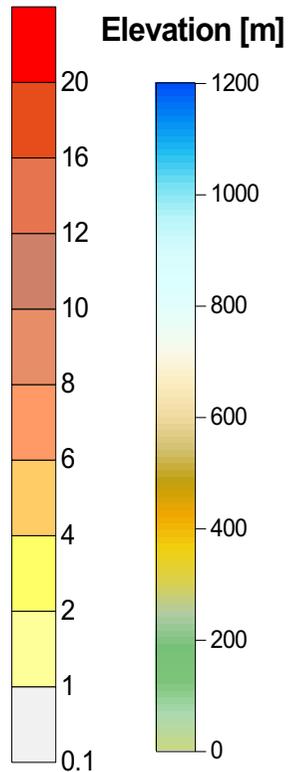
$$\tau = c + \sigma'_n \tan \phi_{app} \quad \tan \phi_{app} = (1 - r_u) \tan \phi' \quad r_u = 1 + \frac{p(t)}{\sigma'_{n0}}$$

Zone	G (MPa)	K (MPa)	γ (kN/m ³)	Viscosity (Pa.sec)	Friction angle (°)	Hydraulic Conductivity (m/s)	Constitutive Model
Outside	4 000	5 000	25	6.16 10 ⁻¹¹	30	10 ⁻⁸	Bingham
La Lama	90	120	20	Ranging from 1.5 10 ⁹ to 4.15 10 ¹¹ (4 parts)	Z < 720 m : 15,5° 720 < Z < 900 m : 14,7° Z > 900 m : 34°	10 ⁻⁵	Bingham

Déplacements du 4 au 21/11/96

Durée de remontée de nappe imposée : 2 jours (pluies intenses)

Displacements [m]



Legend

- vectors of superficial displacements
 - ⊙ vectors vertices of superficial displacements
 - Landslides**
 - - Active landslide
 - - - Ancient or dormant landslide
- | IDW displacements est. from 4/11/96 to 21/11/96 [m] | |
|---|-------------|
| 0 - 0.1 | 8.1 - 10 |
| 0.2 - 1 | 10.1 - 12 |
| 1.1 - 2 | 12.1 - 20 |
| 2.1 - 4 | 20.1 - 36.0 |
| 4.1 - 6 | |
| 6.1 - 8 | |

Merci de votre attention...



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex / V. Vandenberghe

T. +33 (0)1 69 08 30 10 | F. +33 (0)1 69 08 69 05

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

Direction de L'Energie Nucléaire
Direction des Applications Nucléaires de Saclay

Département de Modélisation des Systèmes
et Structures

Service d'Etudes Mécaniques et Thermiques