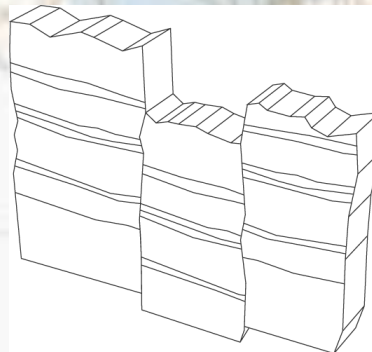




Quelles approches pour une évaluation quantitative des risques naturels ?

Evelyne FOERSTER
e.foerster@brgm.fr



Direction Risques & Prévention

Enjeux et domaines de recherche

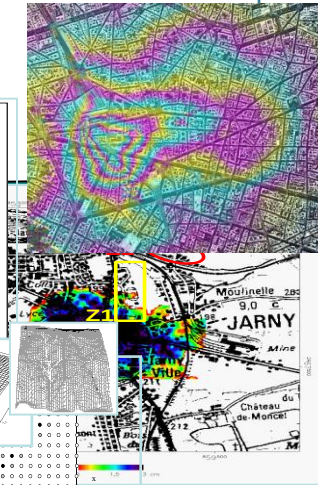
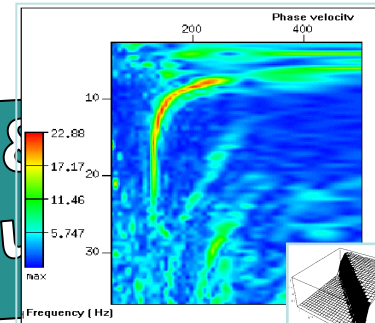
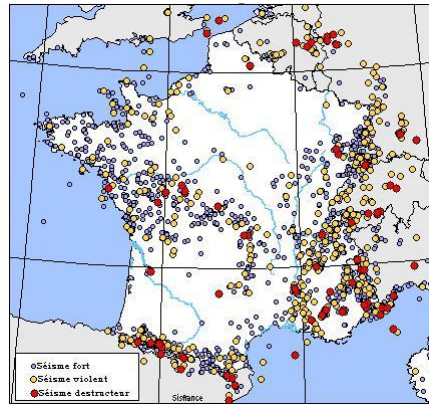
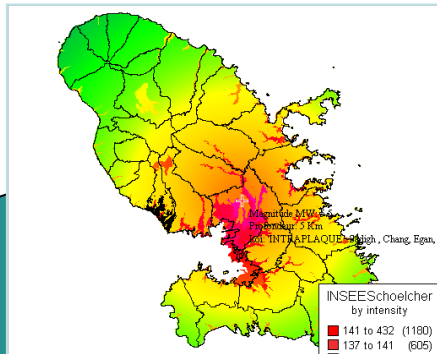


> Evaluer et gérer les risques :

- Identifier, comprendre et quantifier les processus générateurs de l'aléa régional / local (prédiction) :
 - Source (proche ou lointaine)
 - Propagation et « effets de site »
 - Incertitudes aléatoires/épistémiques
- Simuler l'impact sur les éléments exposés et les sites à enjeux (territoires, villes, etc.) :
 - Fragilité des systèmes et de leurs composants
 - Probabilités de dommages directs et indirects
 - Incertitudes

⇒ **Simulations numériques** au cœur de notre démarche **pour quantifier les processus, les conséquences et les incertitudes**

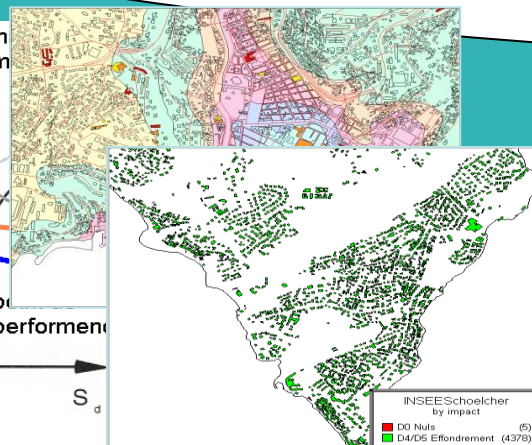
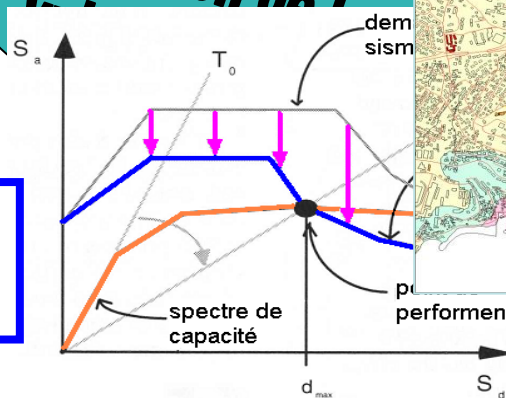
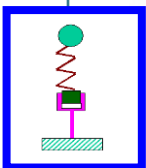
Une approche intégrée



Evaluation de

gestion des risques

Evaluation du risque



Chaîne de simulation pour le Risque Sismique (approches déterministes)

1. Conditions initiales (géologie, géométrie, contraintes, ...)



2. Source (ponctuelle, faille étendue non plane, rupture cinématique ou dynamique)



3. Propagation des ondes et effets de site lin. (régionale)



4. Effets de site /dynamique des sols lin./non lin. (locale)



5. Interactions sols/structures lin./non lin.



6. Vulnérabilité du bâti

Seismostruct, OpenSees, Tremuri

FEM 2/3D

BIEM

Ondes3D (FDM), EFISPEC3D (SEM)

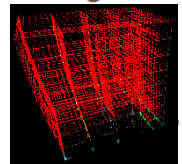
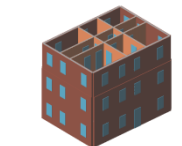
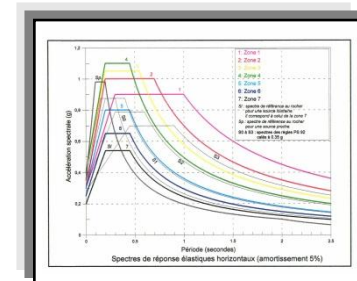
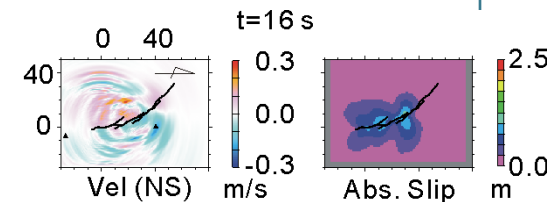
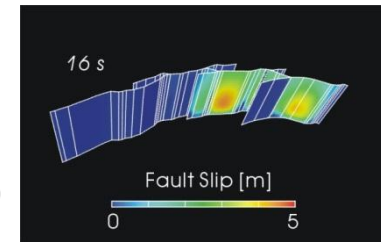
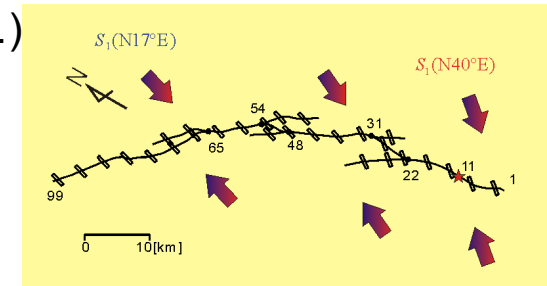
CyberQuake, Gefdyn

FEM 1/2/3D

Gefdyn, OpenSees

FEM 2/3D

Landers 1992 (M7.2)



Modélisation des objets géologiques

- > **Géologie issue de l'éditeur géologique** : géométrie 3D sous forme de fonctions implicites :
 - Générer des grilles/maillages 3D (voxels, tétraèdres...) à partir de l'éditeur
 - Respect des singularités : angles aigus aux intersections de surface, failles, formations très « fines », etc.
 - Respect des contraintes liées aux simulations visées (scénario) : taille et forme des éléments
 - Respect des contraintes topologiques
 - Visualisation
- ⇒ CGAL (Computational Geometry Algorithms Library) : produit de GeometryFactory (spin-off du projet [CGAL](#), initiée chez Geometrica, INRIA Sophia-Antipolis).



Codes brgm pour les Risques (séismes, MVT)

> Analyse dans le domaine fréquentiel :

- *CyberQuake* : géométrie 1D & cinématique 2D/3D (C++, Win/linux)



> Analyse dans le domaine temporel :

- *ONDES3D* : 3D (**FDM**, C, linux, MPI)
- *CyberQuake* : géométrie 1D & cinématique 2D/3D (**FEM**, C++, Win/linux)
- *GEFDYN* : 1D/2D/3D (**FEM**, Fortran, Win/linux, MPI)
- *EFISPEC* : 2D/3D (**SEM**, Fortran, linux, MPI)
- *Movefree* : 1D/2D/3D (**FEM / Meshfree**, C++, Win/linux)
- *Runfree* : St Venant 2D (**EFGM**, C++, Win/linux)

> Couplages de méthodes :

- BIEM - FDM
- FEM - Meshfree (*Movefree*)
- FDM-FEM (*Ondes3D*, *Gefdyn*)

Codes brgm pour les Risques côtiers

- Echelle régionale O(1000 km)
WAVEWATCH III (WW3) ou SWAN
Entrée : vent
→ Génération et propagation de vagues (modèle spectral)

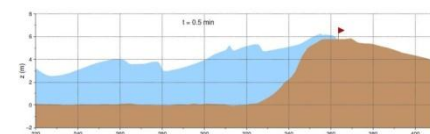
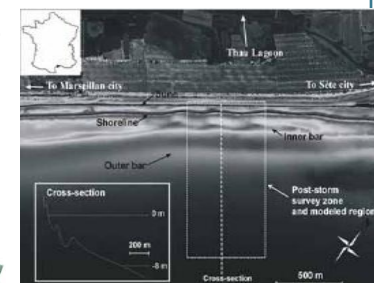
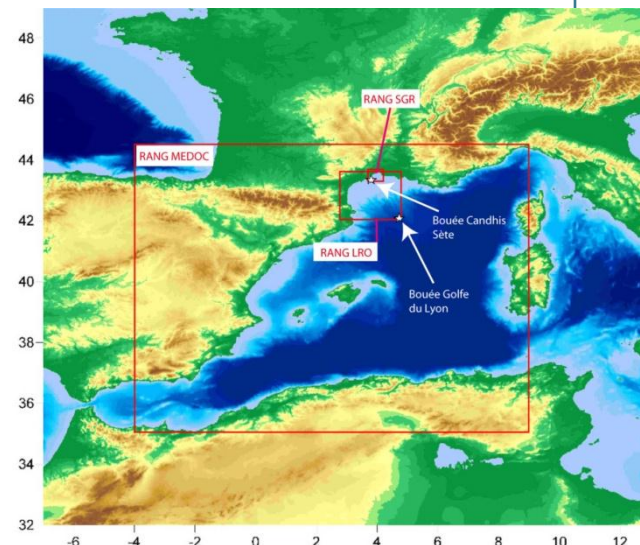
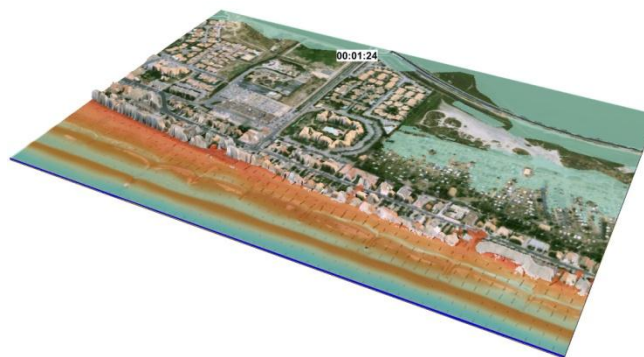
MARS (IFREMER)
Entrée : marée, vent, pression
→ Courants, niveaux (marée + surcote)

- Echelle locale O(1 km)

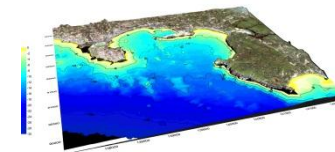
Plateforme MARS – SWAN : processus littoraux (prof. < 20 m)
Entrée : vagues et niveaux (marée + surcote)
→ courants, vagues, niveaux d'eau (wave set-up), évolutions morphodynamiques

SurfWB

Entrée : vagues et niveaux
(marée + surcote + wave set-up)
→ Niveau d'eau total
(marée + surcote + wave set-up + run-up)



Codes brgm pour le Risque tsunami



Utilisation du code recherche GEOWAVE modifié : simulations sur grilles emboîtées (grande emprise vers local)

Génération

- Séisme (algorithmes d'Okada 1985)
- Glissement sous-marin Grilli et Watts 2002
- Glissement sub-aérien Walder et al. 2003

Propagation

- Équations de Boussinesq dérivées par Wei et al. (modèle complètement non linéaire et dispersif)
- Équations de type « ondes longues »
- Réfraction, diffraction, réflexion, gonflement
- Dissipation énergie frottement au fond
- Schéma différences finies → maillage cartésien

Inondation

- Déferlement (Kennedy 1999)
- Traitement zone couvrante-découvrante (technique des slots, Kennedy 2000)

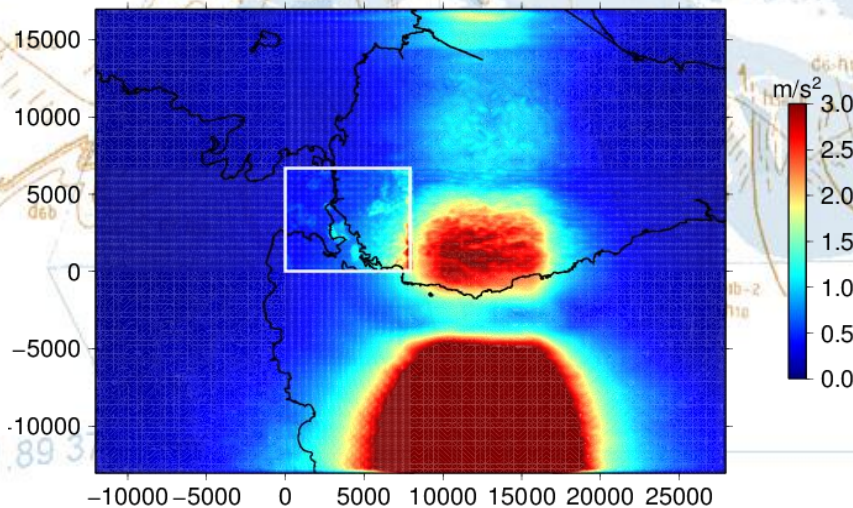
Séisme → tsunami : Calcul de la déformation du plancher océanique à partir des caractéristiques de la faille (pente, dislocation,...) => état initial du tsunami déduit en admettant que l'intégralité de la déformation est instantanément transmise à la surface de l'eau

Glissement → tsunami :

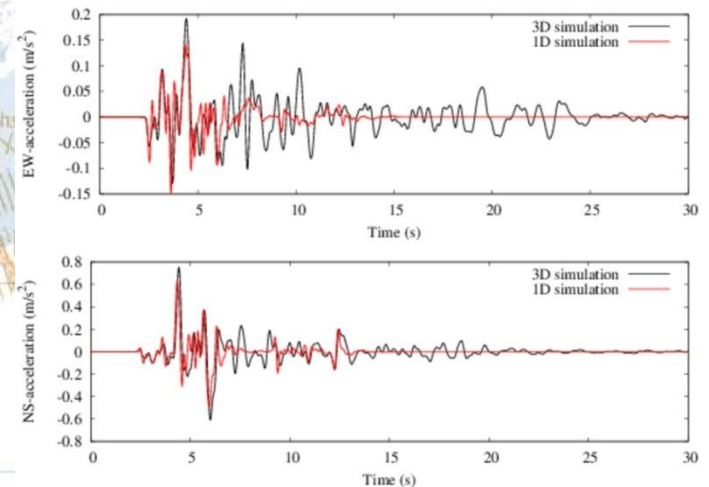
1. glissement traité comme un écoulement fluide : problème résolu par la théorie des ondes longues (longueur du glissement >> épaisseur)
2. glissement considéré comme un corps solide rigide se déplaçant sur un plan incliné : établissement de lois de comportement semi-empiriques reliant les caractéristiques du tsunami aux paramètres physiques du glissement (pente, longueur, épaisseur, largeur, durée, ...)

Approches 1D/3D pour l'évaluation de l'aléa sismique à Pointe-à-Pitre

PGA from 3D viscoelastic simulation
computed by 3D spectral-element method



HOTEL DE VILLE DE POINTE-A-PITRE



Objectifs du projet PAP3D

> Evaluer l'aléa sismique sur la région pointoise

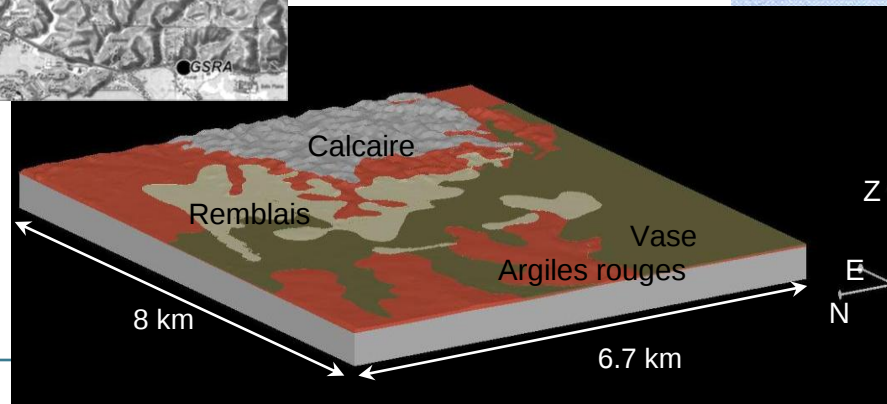
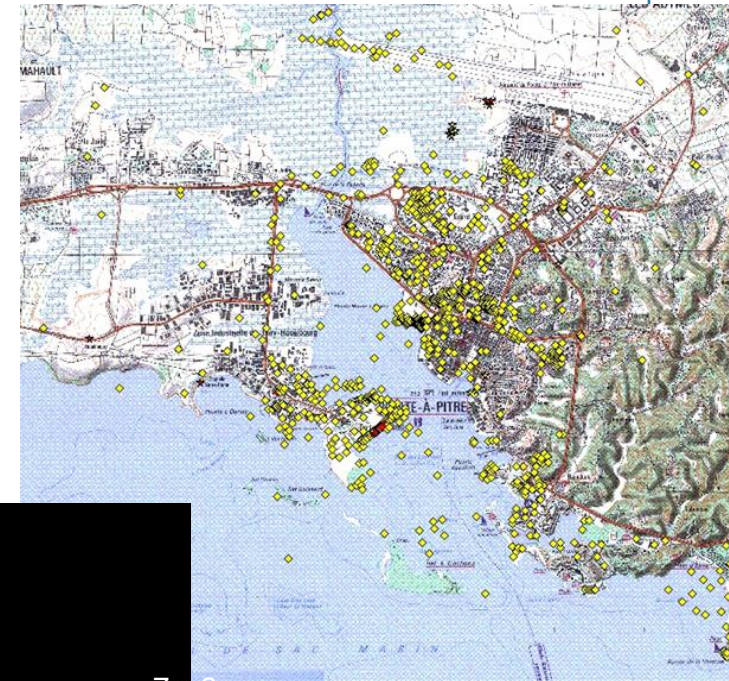
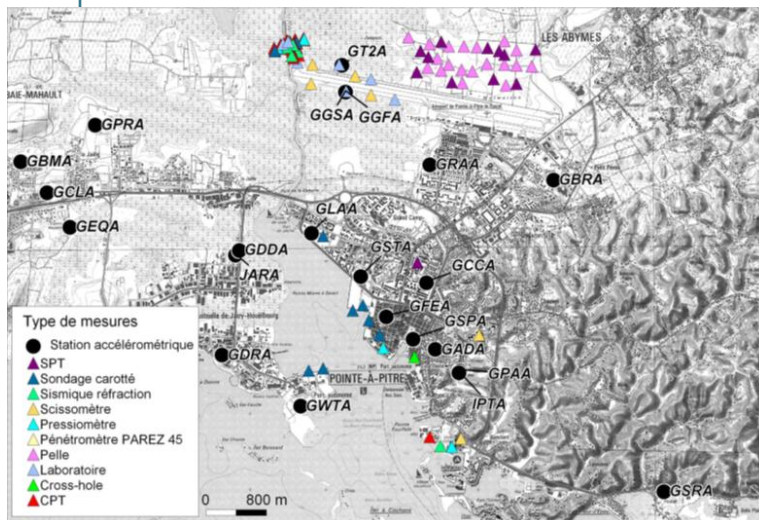
- Simulations sismiques quantitatives linéaires
 - Création d'un modèle géologique avec Geomodeler© (BRGM)
 - Simulations viscoélastiques 3D (modèle régional) hautes fréquences (5 Hz) : EFISPEC3D© (BRGM)
- Analyse des incertitudes :
 - Comparaisons de simulations 1D/3D (modèle local)

> Quantifier l'agression sismique

- Pour différents scénarii (magnitude Mw 6)
- A grande échelle (ville)
- Pour des enjeux ciblés (bâtiments, quartiers)
 - Calcul des sismogrammes sous les enjeux
 - Interactions sols-structures

Le modèle géologique local

- > **Modèle 3D détaillé sur une zone de (8 x 6,7 x 0,1 km³)**
 - Compilation des données de la base BSS + données de microzonage
 - 4 grandes formations identifiées
- > **Inclusion du modèle détaillé dans un modèle régional**
 - Dorel (1978)



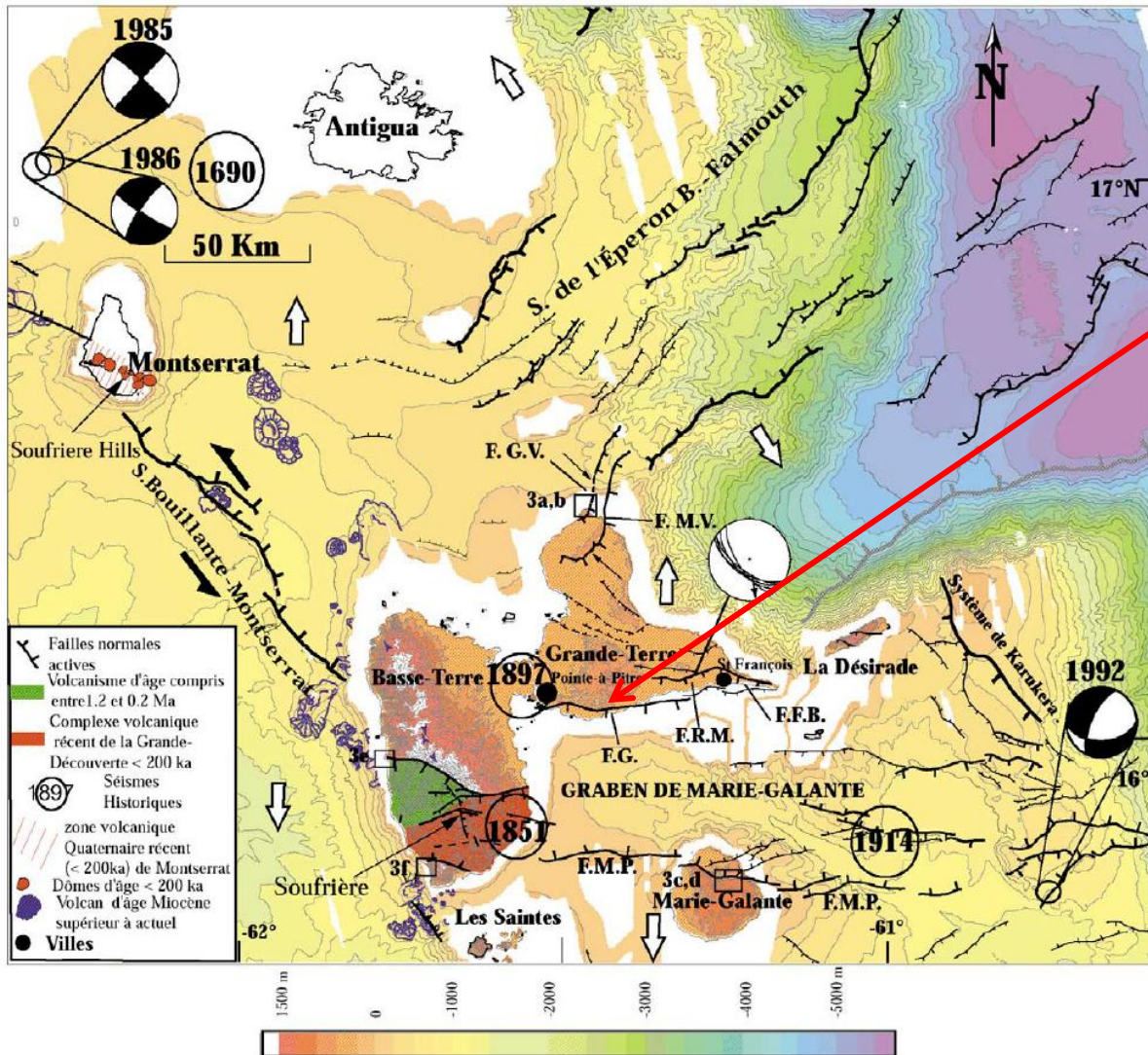
> Modèle de vitesses des ondes P/S et densités

- Compilation des données de différentes campagnes: SASW, H/V
- Facteurs qualité choisis de manière empirique

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques élastiques et viscoélastiques des formations géologiques présentes dans le modèle local (calcaire altéré, vase, argile et remblai) et régional (substratum 1 à 4).

Type de formation	Vitesse de cisaillement (Vs m/s)	Vitesse de compression (Vp m/s)	Densité (kg/m ³)	Facteur de qualité des ondes de cisaillement	Facteur de qualité des ondes de compression
Calcaire altéré	1000	2000	2000	25	75
Argile	350	1000	1700	10	30
Vase	200	1000	1500	10	30
Remblai	250	800	1600	10	30
Substratum 1	1500	3500	2500	50	150
Substratum 2	3410	6000	2500	50	150
Substratum 3	3980	7000	2500	50	150
Substratum 4	4550	8000	2500	50	150

Les scénarii sismiques



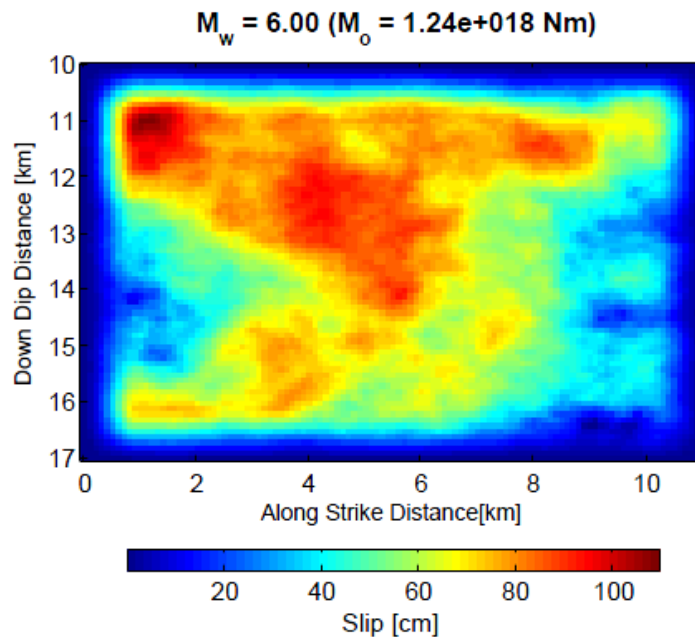
Faule de Gosier
Azimut = 90°
Pendage = 70°
Glissement = -90°

Feuillet (2000)

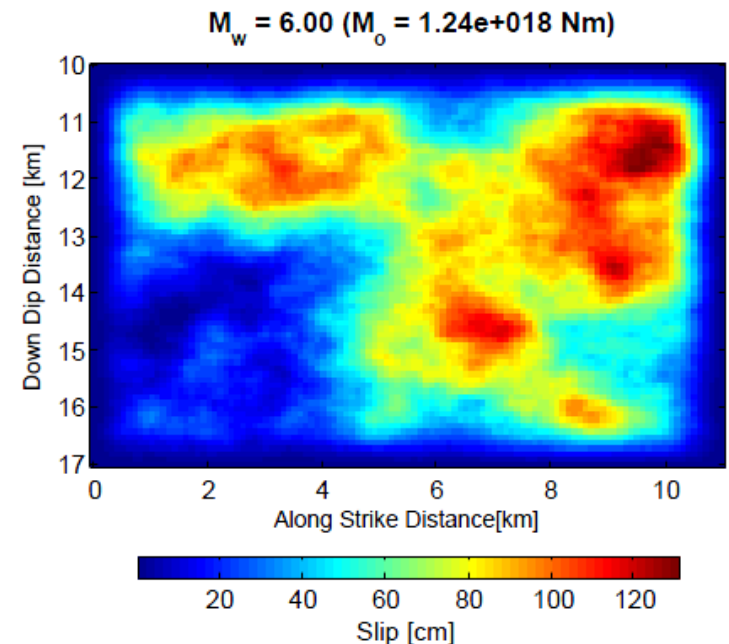
Les scénarii sismiques

> Faille du Gosier

- Génération de rupture aléatoire selon le modèle de Mai et Beroza (2002) pour obtenir des séismes de **magnitude 6** (*7881 segments de faille avec une distribution de glissement hétérogène*)
- Deux scénarii de glissement :
 - Scénario « a »: aspérité proche de Pointe-à-Pitre
 - Scénario « b »: aspérité éloignée de Pointe-à-Pitre



Source scénario « a »



Source scénario « b »

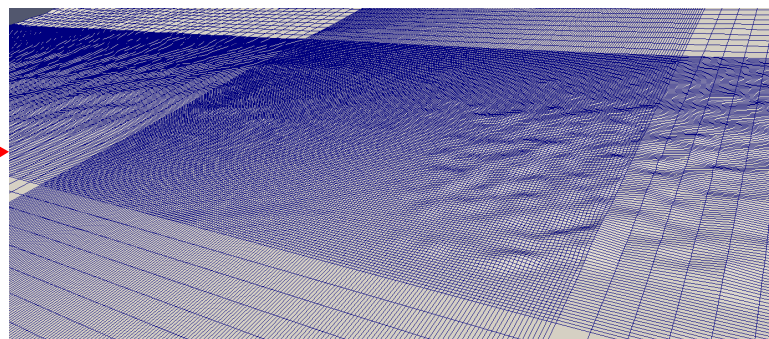
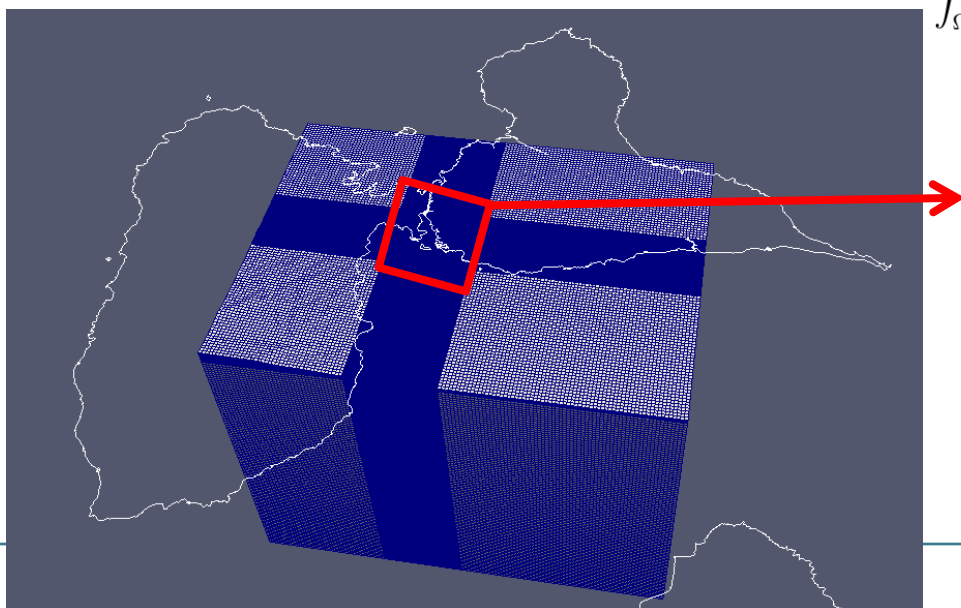
> Simulations 1D viscoélastiques (Thomson-Haskell)

- Grille de 5508 colonne de sol 1D
- Zone : 6,7 km (EW) par 7,9 km (NS) sur 100m (profondeur)

> Simulations 3D viscoélastiques jusqu'à 5hz (SEM)

- Zone : 40 x 30 x 30 km³ (pas de maillage : horizontal = 10m, z = 1m)
- Topographie : DTM 40m
- ~8,2 M d'hexaèdres, ~1.7 M ddl, 120 000 Δt , 13 jours de calcul sur 128 CPUs

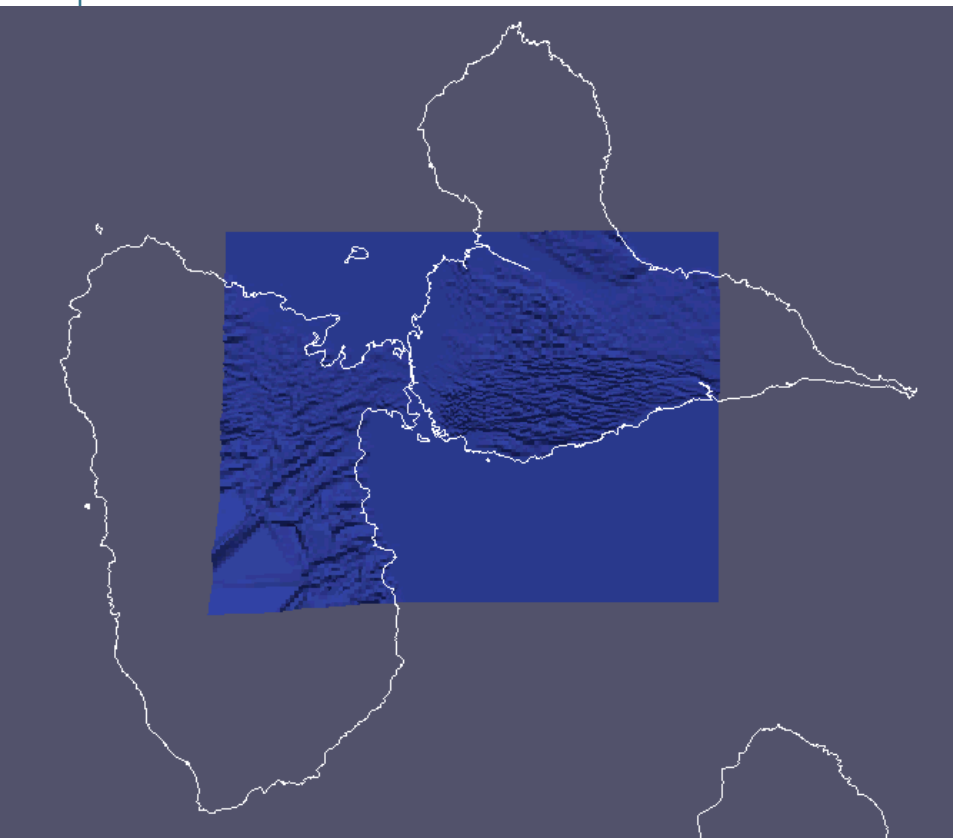
$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{v}^T \cdot \ddot{\mathbf{u}} d\Omega = \int_{\Omega} \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{v})^T : \boldsymbol{\tau} d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{f} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{T} d\Gamma$$



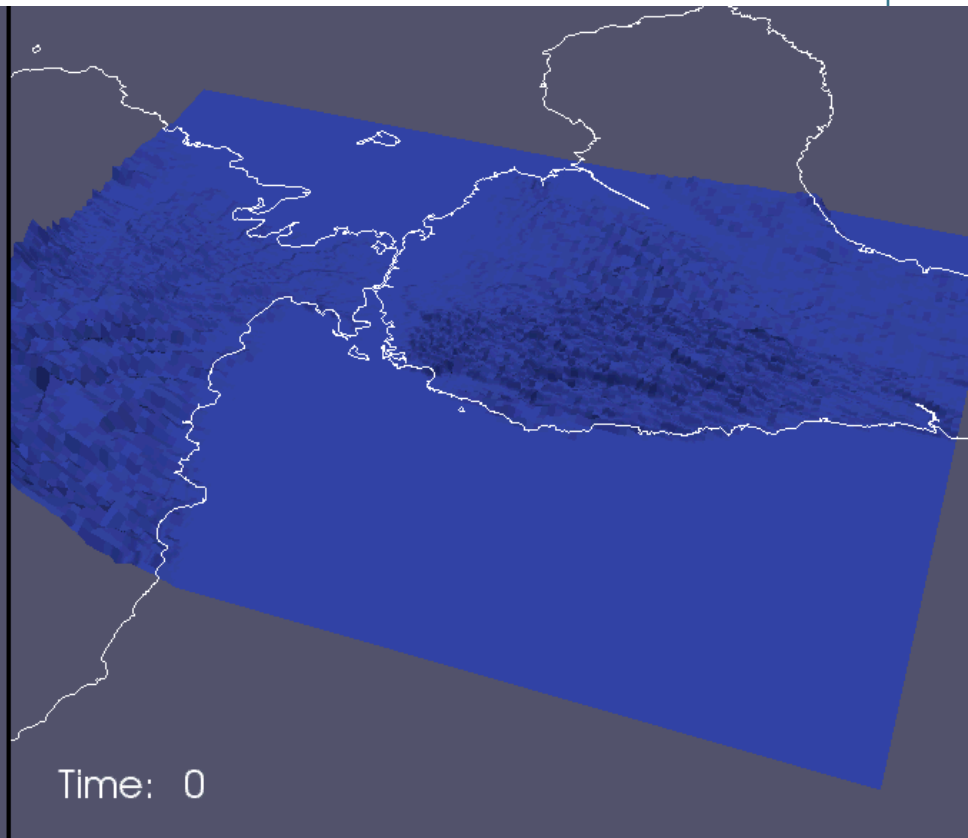
Evaluation de l'aléa par simulations 3D/1D

scénario « a »

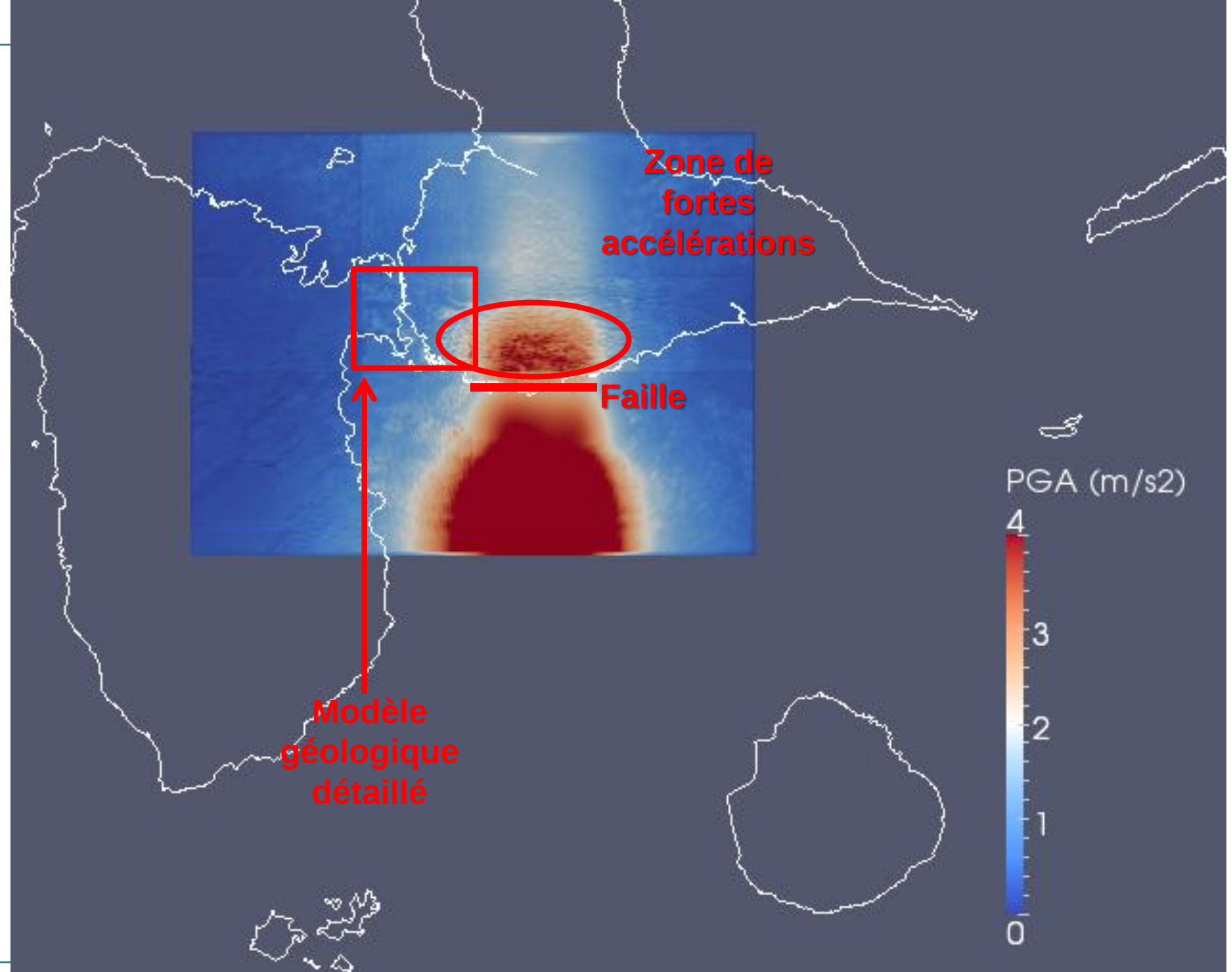
Valeur absolue de l'accélération (3 directions)

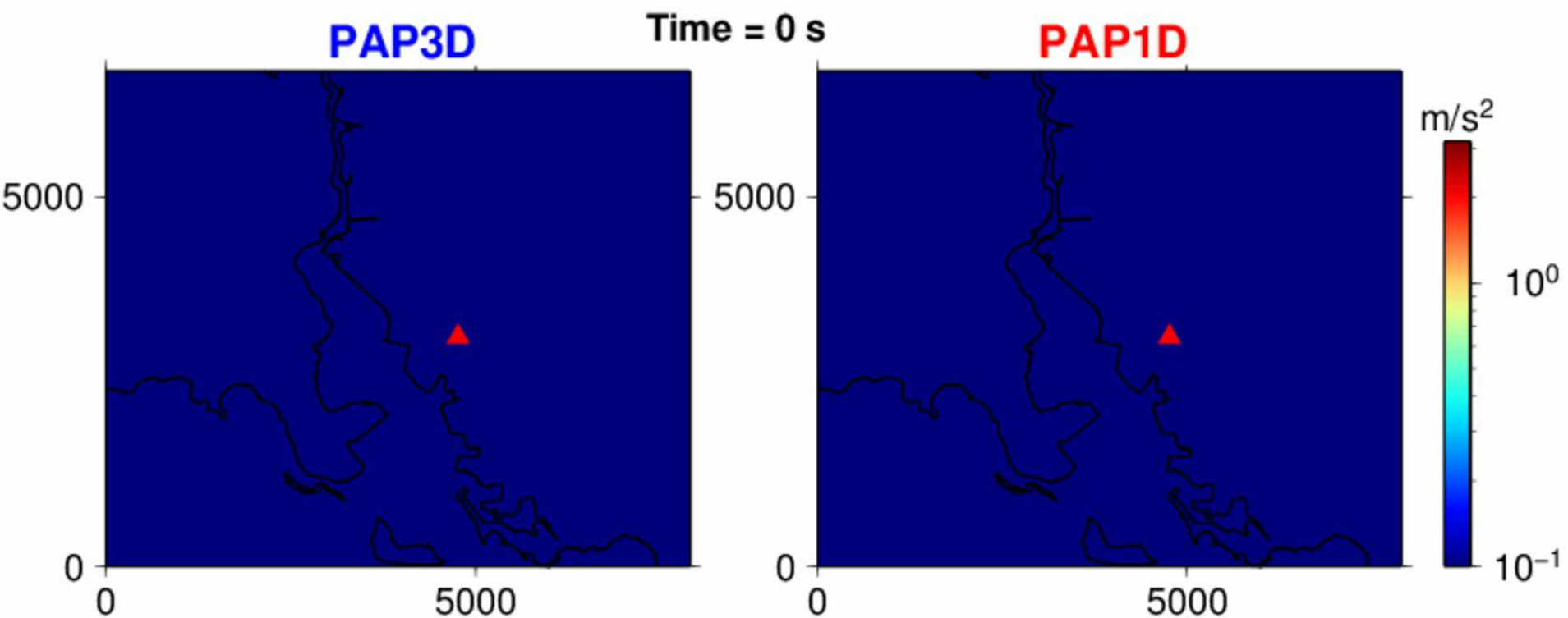


Vue de dessus



Vue isométrique



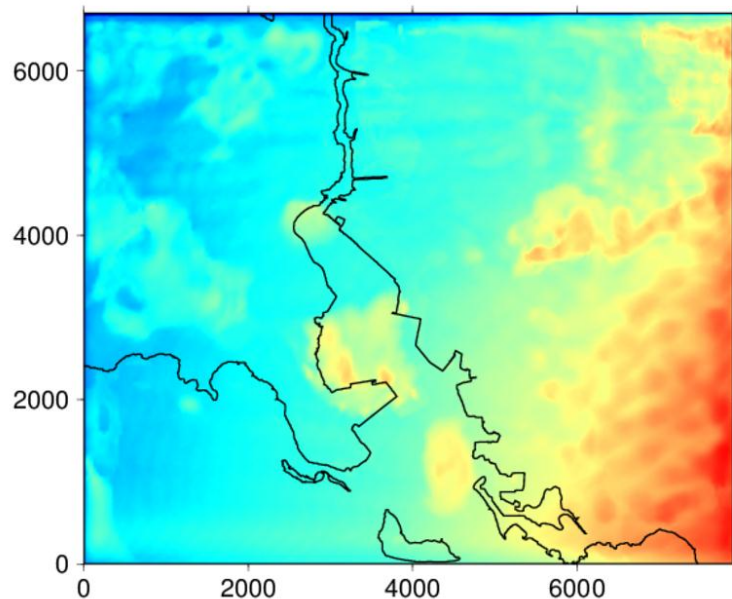


Seisme sous l'hotel de ville (▲)
Comparaison **1D** vs **3D**

Evaluation de l'aléa par simulations 1D/3D

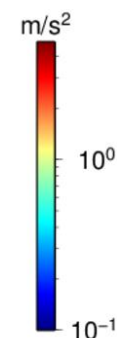
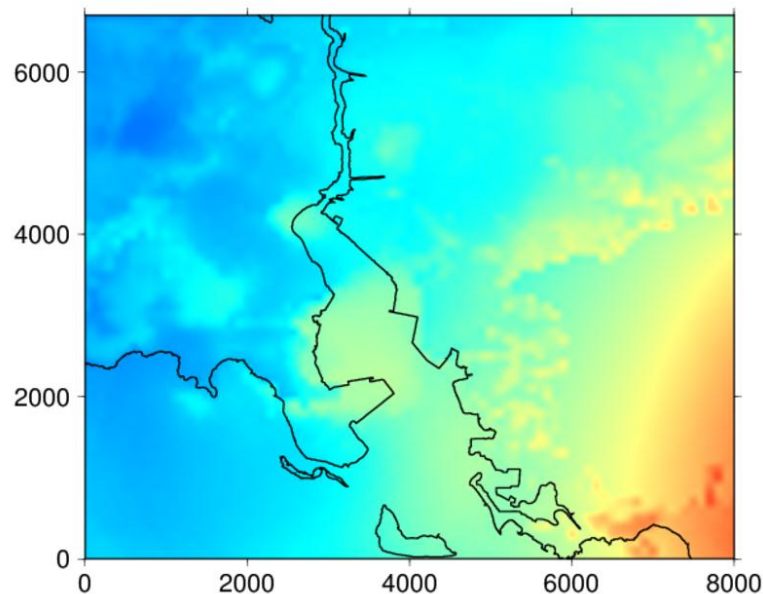
PGA from 3D viscoelastic simulation

computed by 3D spectral-element method (code EFISPEC3D)



PGA from 1D viscoelastic grid simulations

computed by Thomson-Haskell propagator matrix method

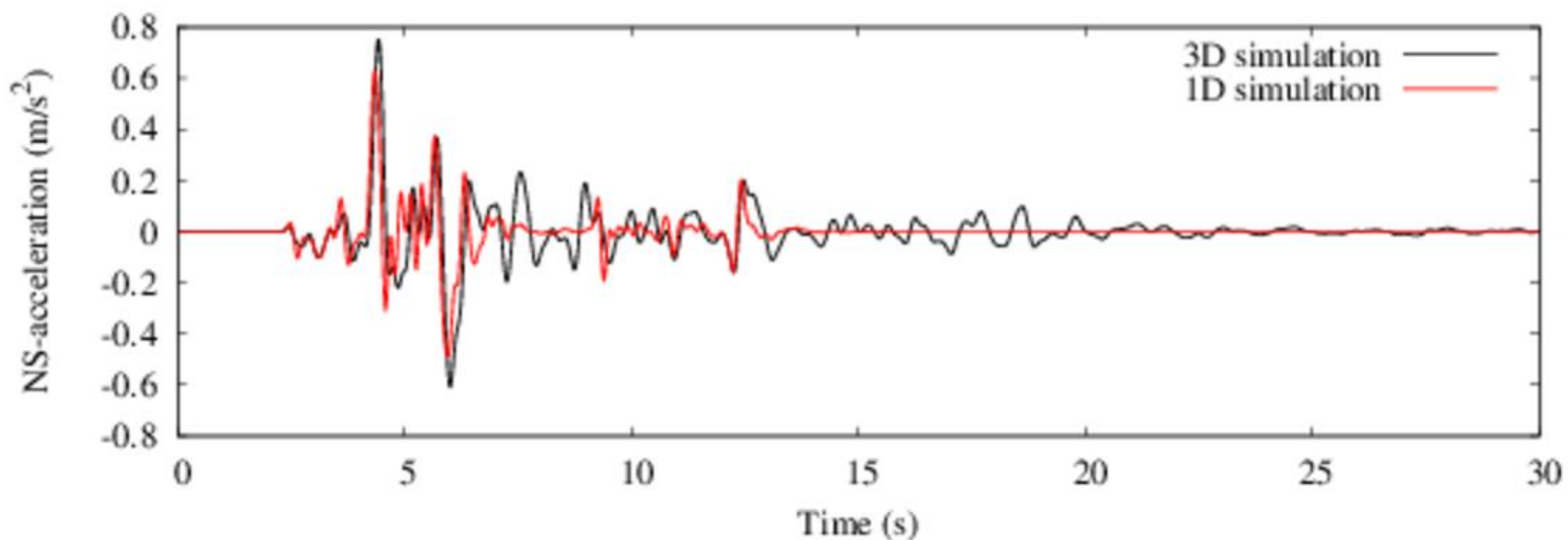
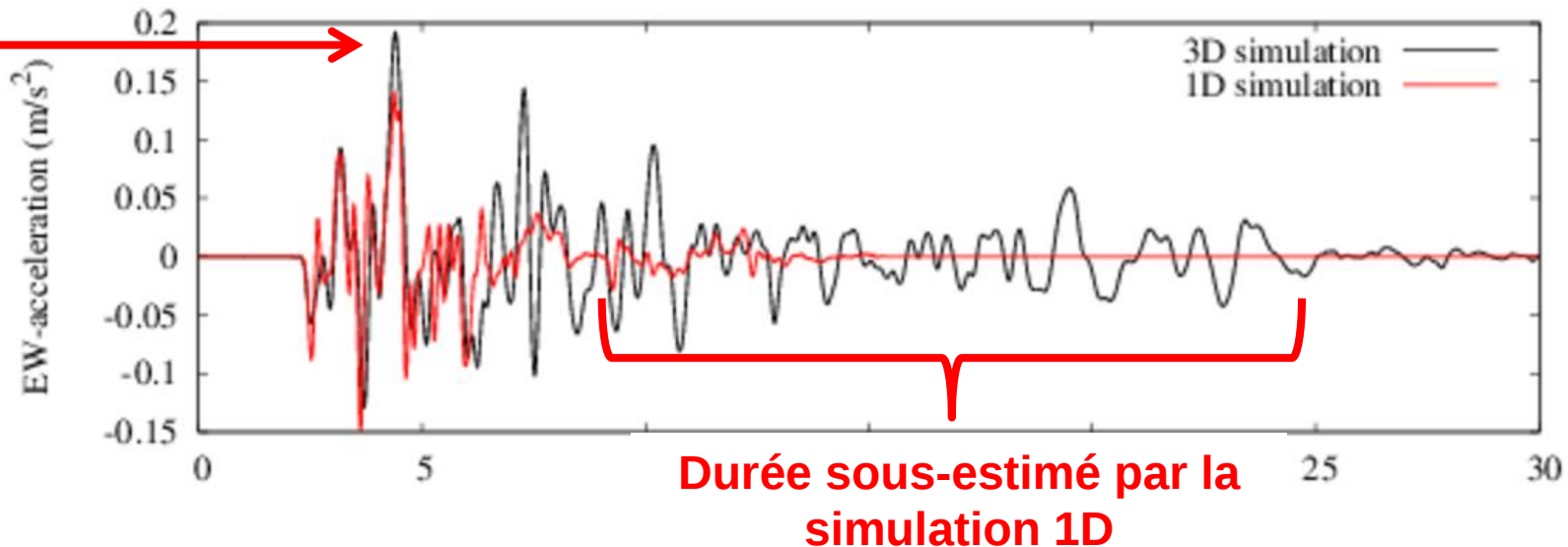


Sous-estimation des PGA par les simulations 1D

Evaluation de l'aléa par simulations 1D/3D

HOTEL DE VILLE DE POINTE-A-PITRE

PGA sous
estimé d'un
facteur 1.33
par la
simulation
1D





Modélisation (HPC) – Risque côtier

Régionalisation dynamique des conditions de vague dans le Golfe de Gascogne pour différents scénarios futurs d'émission de gaz à effet de serre (échéance 2100)

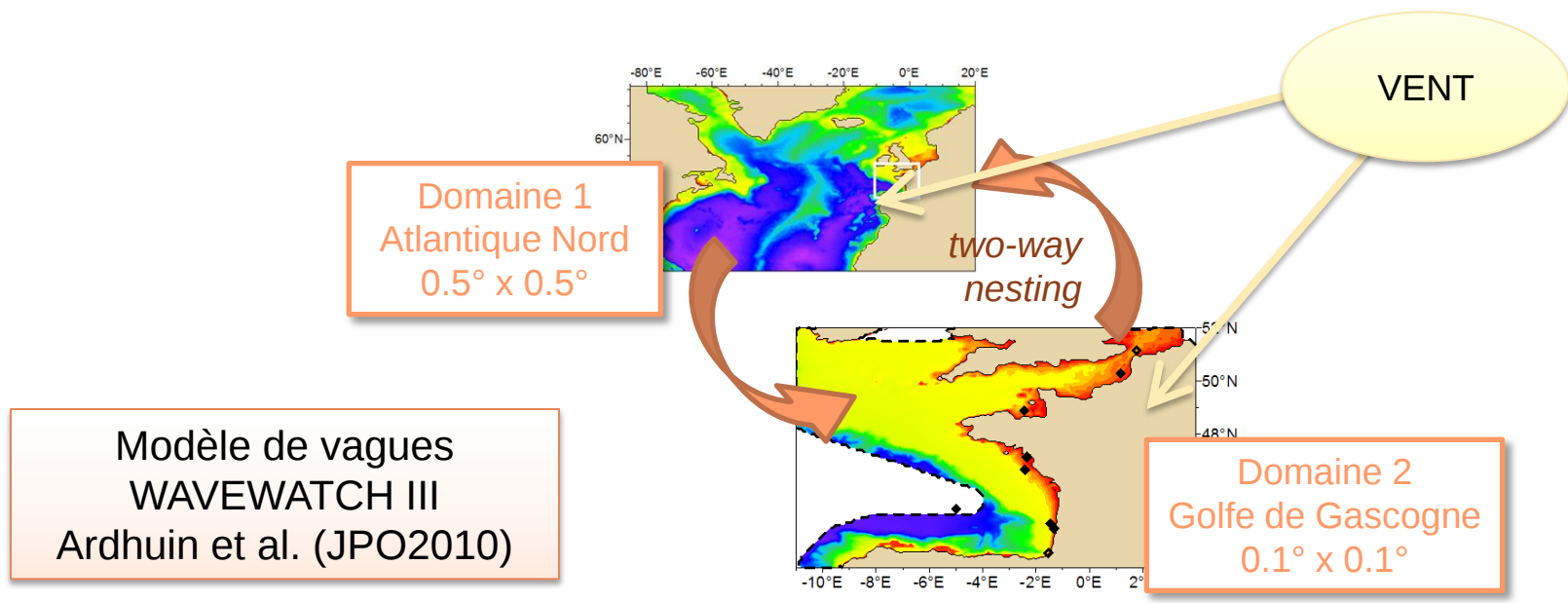
Elodie CHARLES

Thèse financée par AXA Research Fund

Co-encadrement Météo France et BRGM : Pascale DELECLUSE et Déborah IDIER

Contexte et objectifs de la thèse

- > **Problématique** : l'impact des changements climatiques sur le climat de vagues passé (~1960-2000) et futur (~2060-2100) en zone côtière
- > **Objectif** : Caractériser les changements de hauteur H , période T et direction D à l'horizon 2100 dans le Golfe de Gascogne
- > **Constat** : pas de données d'états de mer sur de longues périodes (≥ 40 ans) passées et futures, avec une couverture spatiale fine (≤ 10 km) de la zone littorale aquitaine
- > **Solution choisie** : la modélisation numérique

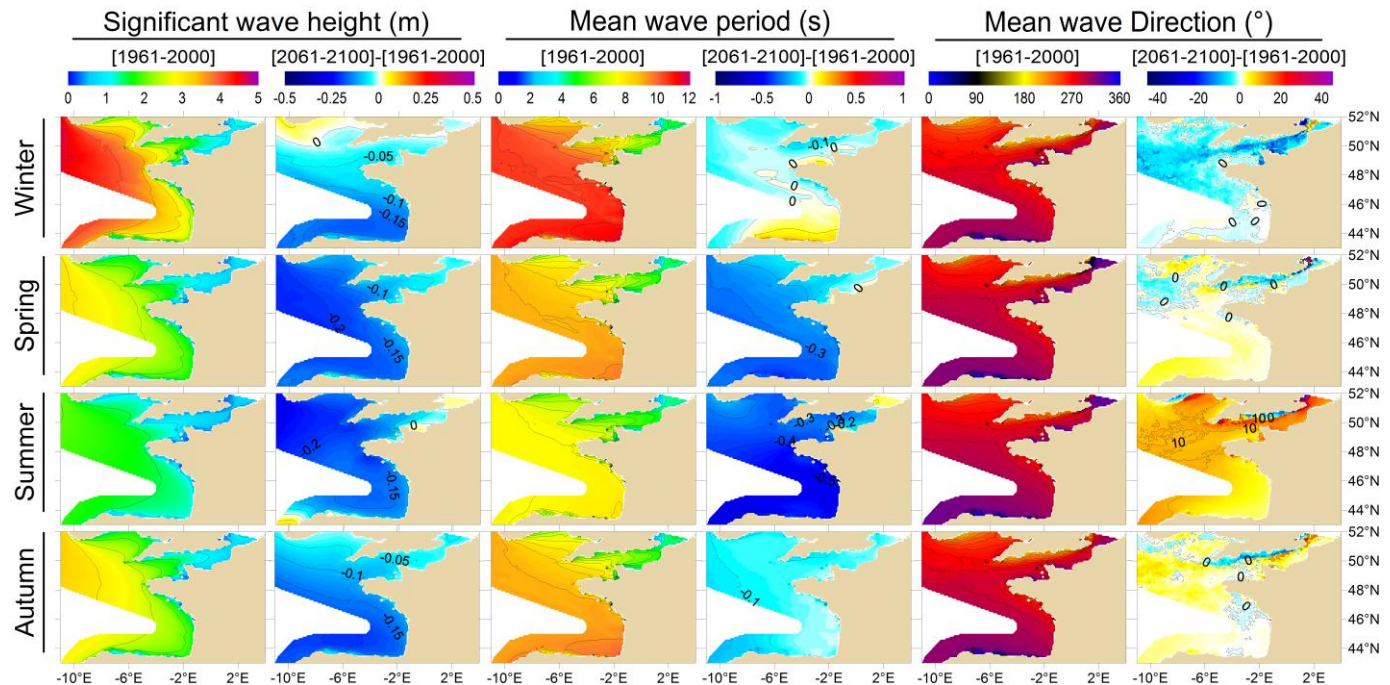


Climat futur/actuel : scénario A2 à l'échelle régionale

Principaux changements entre les climats de vague actuel (1961-2000) et futur (2061-2100) dans le Golfe de Gascogne

	Hs	Tm	Dm
Hiver	-		
Printemps	--	--	
Été	--	--	++
Automne	--	-	

Hauteur, période et direction moyennes pour le climat actuel (1ères colonnes) et changements entre scénarios REF et A2 (2ndes colonnes) pour chaque saison



- **Pas d'augmentation des Hs**, au contraire, diminution pour toutes les saisons
- **Peu de changements en hiver** : diminution des Hs (-5 à -15 cm), T et D stables
- **Le plus de changements en été** : forte diminution des Hs (-10 à -20 cm pour des Hs < 1.5 m) et diminution des T (-0.5 s), décalage des directions vers le Nord (+6°)

Temps de calcul et espaces de stockage

Utilisation intensive des calculateurs :

- 1) Calibration du modèle effectuée sur DOGGER (grappe BRGM)
- 2) Climat actuel : simulation sur 44 années passées (forçage vent ERA-40) effectuées sur PHOEBUS (calculateur Centre de Calcul de la Région Centre, 2009)

6 jours de calcul sur 192 cœurs pour 44 années

- 3) Climat futur : simulations sur 1 scénario de référence et 3 scénarios futurs de 40 années chacun (forçage vent ARPEGE) sur JADE (calculateur CINES/GENCI, 2010)

4 x 3,5 jours de calcul sur 128 cœurs pour 40 années = 14 jours

Espace de stockage pour les sorties de WW3 : **1,2 To**

- Fichiers de sortie binaires
- Spectres de vague (Energie(fréquence,direction,t))
- Grille Golfe de Gascogne (H,T,D, dt=3h)
- Bouées (H,T,D, dt=1h)

Remarque : modélisation des vagues à haute résolution spatio-temporelle sur un 3^e domaine (côte aquitaine, 1km x 1km) réalisée sur DOGGER , PHOEBUS et JADE
~5x70 heures de calcul sur 128 cœurs et 700 Go de données stockées

Conclusions & Perspectives

> Evaluations quantitatives larges échelles (espace/temps) :

- Incertitudes sur les données et complexité du modèle (variabilité, ...)
- Besoins de mémoires importants
- Plusieurs Go/To à stocker :
 - Des milliers d'étapes de calcul
 - Des millions de degrés de libertés (u, v, a, p, T,...)
 - Données aux points d'intégration : tenseurs de déformation/contraintes, nombreux paramètres d'histoire (lois de comportement non linéaires),...

⇒ Nécessité de disposer d'un **environnement de calcul et de visualisation performants** pour répondre à une demande croissante vis-à-vis des **calculs 3D complexes**

⇒ **Précision problématique**

Conclusions & Perspectives

> **Besoins d'outils de calculs optimisés:**

- Aspects numériques (partitionnement, résolution, ...)
- Ressources : développement GPU, ...

> **Traitement des incertitudes (spatiales, paramètres physiques, comportement, ...) :**

- Méthodes non intrusives : adaptation des codes pour pilotage externe
- Méthodes intrusives : formulation stochastique « intégrée »

Collaborations récentes/actuelles (BRGM/RIS – MAPMO)

> Code de ruissellement + infiltration (ANR Méthode)

- Stages M2

> Erosion

- Thèse de LE Minh Hoang : « Modélisation numérique des processus d'érosion à l'échelle des bassins versants » (BRGM – MAPMO – Région Centre)

