



**HAL**  
open science

## Benchmark SEM3D sur des instances Google Cloud de type C2D optimisées pour le calcul utilisant le processeur AMD EPYC et sur GPU Nvidia A100

Filippo Gatti, Ludovic Aubry, Éric Germaneau, Régis Cottureau, Wilfried Kirschenmann

### ► To cite this version:

Filippo Gatti, Ludovic Aubry, Éric Germaneau, Régis Cottureau, Wilfried Kirschenmann. Benchmark SEM3D sur des instances Google Cloud de type C2D optimisées pour le calcul utilisant le processeur AMD EPYC et sur GPU Nvidia A100. CSMA 2024, 16ème Colloque National en Calcul des Structures, Association Calcul des Structures et Modélisation (CSMA), May 2024, Giens (Var), France. hal-04565088v2

**HAL Id: hal-04565088**

**<https://hal.science/hal-04565088v2>**

Submitted on 7 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Benchmark SEM3D sur des instances Google Cloud de type C2D optimisées pour le calcul utilisant le processeur AMD EPYC et sur GPU Nvidia A100.

F. Gatti<sup>1</sup>, L. Aubry<sup>2</sup>, É. Germaneau, R. Cottureau<sup>3</sup>, W. Kirschenmann<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, UMR 9026, France

<sup>2</sup> CEA/DAM/DIF, Arpajon, France

<sup>3</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, LMA UMR 7031, Marseille, France

<sup>4</sup> ANEO, France

**Abstract** — Cette contribution vise à montrer les résultats et performances du simulateur de propagation d'onde 3D à haute fidélité SEM3D (déposé [1, 2] et open source) sur GPU et sur cloud. SEM3D est principalement employé pour simuler des tremblements de terre dans le domaine solide-fluide, des failles actives à la surface libre, à travers des régions urbaines de  $\approx 100 \text{ km} \times 100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$  de large. Les benchmarks effectués sur machine AMD sur Google Cloud Platform (GCP) et sur GPU Nvidia A100 sur le supercalculateur Jean Zay de l'IDRIS.

**Mots clés** — SEM3D, HPC, propagation des ondes élastoacoustiques, Google Cloud Platform, GPU, Nvidia, A100, Jean Zay.

## 1 Introduction

Les tremblements de terre font partie des phénomènes naturels les plus complexes à comprendre et à prévoir pour les scientifiques. Le bien-fondé d'une meilleure évaluation des risques sismiques (SHA) est motivé par la grande incertitude sur les mécanismes à l'origine, associée à leur potentiel de catastrophe, à l'exposition accrue du portfolios et à la demande structurelle. Le SHA peut être évalué soit en suivant une approche déterministe (DSHA), soit en considérant une approche entièrement probabiliste (PSHA). Alors que la première approche consiste en une modélisation directe conservatrice du scénario de secousses du sol les plus intenses, le second porte sur les statistiques tirées des observations précédentes de forts mouvements du sol) [3]. Dans ce contexte, de nombreux événements historiques de forts mouvements du sol ont été reproduits avec succès en utilisant des simulations numériques textuelles (PBS) [4–11]. Les PBS fournissent d'excellentes informations sur les subtilités de l'anatomie des tremblements de terre, caractérisant le mouvement des ondes sismiques 3D dans des conditions proches de la faille (y compris les effets de directivité possibles) et incluant les interactions complexes avec la topographie de la surface et les paramètres géologiques (ondes de surface, piégeage d'onde au sein de structures en forme de bassin).

La simulation basée sur la physique a été rendue possible grâce au développement de codes numériques haute fidélité et hautes performances, déployés avec succès sur de grandes infrastructures de supercalculateurs CPU et GPU. A titre d'exemple, un résultat impressionnant a été obtenu par un groupe de recherche chinois, qui a réalisé une simulation de tremblement de terre non linéaire sur une région continentale de 320 km sur 312 km sur 40 km, jusqu'à 18 Hz [12]. L'utilisation d'octrees a rendu possible un haut degré d'évolutivité dans la génération de maillage utilisant jusqu'à 220 000 cœurs [13]. Des études récentes [14, 15] ont ouvert la voie à l'utilisation du PBS, traditionnellement utilisé pour le DSHA, également dans le PSHA, via des techniques de planification optimisées et d'échantillonnage de scénarios. De plus, le PBS haute fidélité a élargi les horizons de recherche concernant l'étude de caractéristiques complexes telles que l'atténuation et la cohérence de l'onde coda dans les signaux sismiques, la directivité et l'incohérence du mouvement des ondes à proximité de la source et les effets de site non linéaires [16] entre autres. L'avènement de l'informatique exascale favorise le développement de simulateurs sismiques de bout à bout, *i.e.*, des ombres numériques des structures et infrastructures critiques [17], capables de fournir une prévision du risque sismique et une réponse structurelle fiables et en temps quasi-réel, ainsi

que des cartes mises à jour du risque sismique pour les politiques publiques réglementaires.

Un obstacle majeur entravant l'utilisation intensive de la réponse synthétique aux secousses du sol dans la conception structurelle est la limitation du PBS à un intervalle de fréquence relativement faible, atteignant des précisions maximales au-delà de 1 Hz, mais jusqu'à 10 Hz. Cependant, l'empreinte vibratoire des structures aériennes critiques et des composants de systèmes non structurels associés (tels que les systèmes de tuyauterie et autres équipements) est caractérisée par des modes propres de résonance bien au-dessus de 5 Hz [18] et jusqu'à 40 Hz. Les raisons derrière cet écart entre les simulations de faille sur site et de site à structure sont (i) la demande de calcul croissante impliquée par une discrétisation spatiale plus fine sans crénelage, nécessaire pour simuler les interactions d'ondes à des longueurs d'onde plus courtes ; (ii) la grande incertitude sur la configuration géologique et tectonique souterraine, empêchant l'étalonnage précis du modèle numérique.

Dans cette contribution, nous présentons des stratégies pour lever le premier verrou mentionné, en proposant un déploiement de SEM3D sur machine CPU AMD, fournies par la plateforme Google Cloud (GCP) et l'implémentation OpenACC de SEM3D (renommé ici SEM3D-GPU) qui nous permet désormais d'effectuer des simulations sur des multiples GPU Nvidia A100. La Section 2 introduit brièvement la méthode numérique et ses avantages, ainsi que les astuces d'implémentation. La Section 3 présente les résultats du benchmark entre processeur Intel et AMD, sur instances C2D fournies par la GCP. La Section 4 compare les performances de SEM3D version CPU et sa version portée sur GPU via OpenACC. Dans ce cadre, les performances énergétiques sont reportées, identifiant la version GPU comme la plus performante en terme de consommation d'énergie électrique et la moins impactant en terme d'émissions de GES.

Les comparaisons ci-dessous suivent l'approche la plus couramment adoptée pour évaluer les performances des logiciels de calcul intensif : celle de tester leur scalabilité faible et forte. Nous comparons les performances obtenues avec différents nombres de nœuds de calcul. Dans le cas de la scalabilité forte, le même problème est utilisé pour toutes les mesures. Dans le cas de la scalabilité faible, à mesure que nous doublons le nombre de nœuds, la taille du problème est également doublée.

## 2 Présentation du code SEM3D

SEM3D [1, 2] est un logiciel qui résout les équations de l'élasto-acoustique 3D, basé sur la méthode des éléments spectraux (SEM) basé sur des éléments finis à géométrie hexaédrique, linéaire ou quadratique. La méthode SEM utilise une approximation polynomiale d'ordre élevé pour atteindre une grande précision de l'approximation numérique. SEM3D est écrit en Fortran 95 et utilise MPI pour ses communications parallèles. Les entrées/sorties sont effectuées à l'aide de la bibliothèque HDF5. Les maillages sont non structurés et composés d'hexaèdres conformes. La bibliothèque METIS <sup>1</sup> est utilisée pour partitionner le maillage lors des calculs parallèles. La discrétisation est basée sur des éléments spectraux en espace et un schéma explicite en temps (à la fois pour les cas élastiques et non linéaires). La méthode des éléments spectraux est une variante des méthodes d'éléments finis qui utilise des polynômes de Lagrange d'ordre élevé sur des réseaux de points de Gauss-Lobatto-Legendre (GLL). L'utilisation d'une quadrature sur ces mêmes points garantit que la matrice de masse est diagonale. Par conséquent, l'inversion de la matrice de masse à chaque pas de temps n'est pas coûteuse et les pas de temps très courts, imposés par le schéma explicite, ne posent pas de problème. SEM3D et le code RegSEM [19, 20] sont basés sur une version commune. Par rapport à RegSEM, SEM3D utilise un schéma de communication asynchrone. En outre, les structures de données sont stockées de manière à favoriser la vectorisation, comme le montre la Figure 1.

Les forces internes sont calculées à chaque itération, sur des boucles de longueurs fixes, 4 ou 8 respectivement, et établies au moment de la compilation. Cette configuration s'adapte naturellement aux relations constitutives viscoélastiques et non linéaires : dans SEM3D, un modèle de Zener généralisé est mis en œuvre [21], ainsi qu'un modèle rhéologique non linéaire simple [22]. Les améliorations apportées depuis la version originale ont permis d'accélérer considérablement le code, comme en témoigne la Figure 2b.

Dans le cadre de [23], l'auteur a effectué les tests de vérification et de validation proposés par [24] pour le test de référence E2VP<sup>2</sup>. La Figure 2a montre un exemple de courbe de scalabilité faible obtenue

<sup>1</sup><http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/views/metis>

<sup>2</sup>La solution de référence a été téléchargée sur l'interface web sismologique interactive SISMOWINE utilisée pour

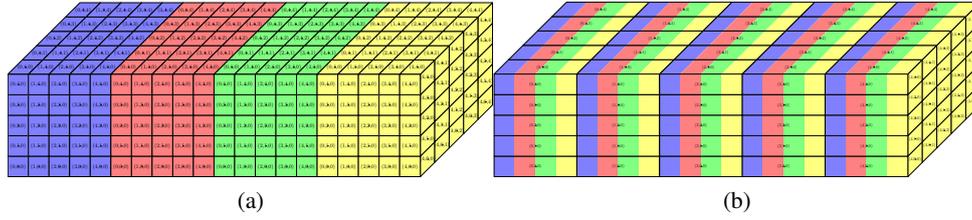


Figure 1: Schéma de vectorisation. (a) Ordre de stockage non vectorisé  $i, j, k, e$ . (b) Ordre vectorisé  $ee, i, j, k, b$ , avec  $ee = e \bmod 4$  et  $b = e/4$ .

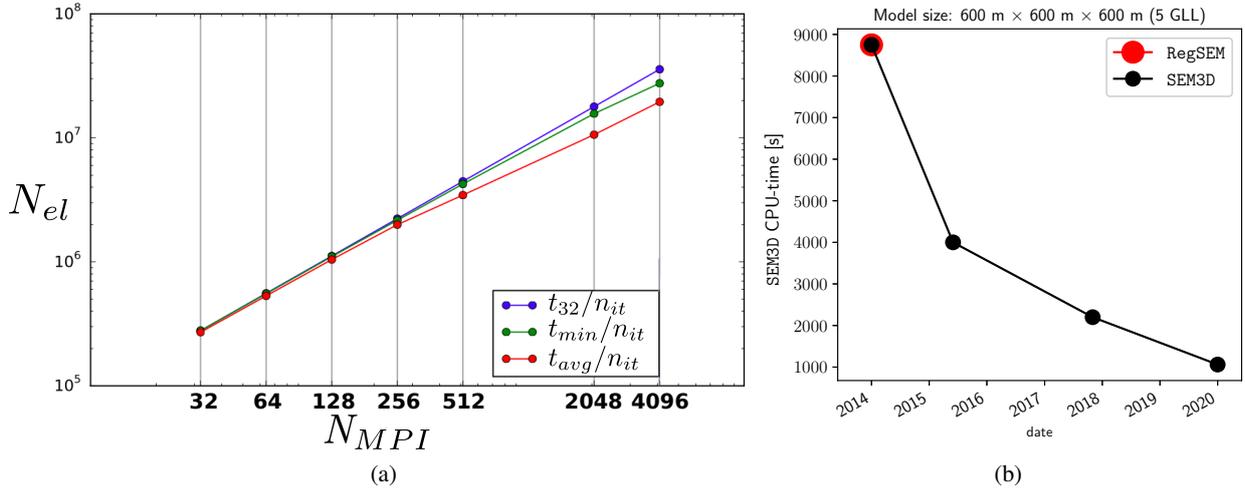


Figure 2: (a) Courbe de scalabilité faible, obtenues pour SEM3D. Exprime le nombre de mailles traitées par seconde en fonction du nombre de processus MPI utilisés, pour un nombre constant de mailles par processus. En bleu, la courbe d’extensibilité linéaire représente le résultat idéal *optimum* (extensibilité parfaitement linéaire). Les lignes verte et rouge représentent les performances *maximum* et *moyenne*. (b) Amélioration de SEM3D par rapport à la version initiale de RegSEM. Les valeurs du temps CPU se réfèrent au temps équivalent mono-cœur requis pour résoudre un problème de propagation d’ondes dans un cube de  $600 \text{ m} \times 600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ , avec PML sur tous les côtés et  $5 \times 5 \times 5$  GLL par élément de taille  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ .

pour SEM3D.

La plus grande simulation SEM3D réalisée à ce jour est le cas test Argostoli présenté par [2] (voir les caractéristiques du maillage dans le tableau 1), précédemment exécuté sur la machine CINES Occigen.

$N_E$	$N_D$	$\mathcal{L}_x \cdot \mathcal{L}_y \cdot \mathcal{L}_z \text{ [km}^3\text{]}$	$\Delta_x^{min} \cdot \Delta_y^{min} \cdot \Delta_z^{min} \text{ [m}^3\text{]}$
$\approx 4.5 \cdot 10^6$	$\approx 9.8 - 13.5 \cdot 10^9$	$44 \times 44 \times 63$	$130 \times 130 \times 35$

Table 1: Caractéristiques du maillage pour le scénario de séisme de l’île de Céphalonie [2].  $N_E$  : nombre d’hexaèdres (8 nœuds) ;  $N_D$  : nombre de degrés de liberté ( $10 \times 10 \times 10$  GLL  $\times 3$  par élément) ;  $\mathcal{L}_x - \mathcal{L}_y - \mathcal{L}_z$  taille des domaines ;  $\Delta_x^{min} - \Delta_y^{min} - \Delta_z^{min}$  taille minimale des éléments.

Le modèle numérique a été construit en multipliant par deux le nombre de points GLL par bord (ce qui donne  $10 \times 10 \times 10$  points GLL par élément), pour un total de  $\approx 13.48 \cdot 10^9$ . Nous avons simulé avec succès un tremblement de terre de 20 secondes, consommant environ 81100 heures de CPU. Nous avons testé SEM3D sur le même cas test, sur Jean Zay CSL, avec 4000 et 8000 processus MPI respectivement, avec un montant d’heures CPU (mono-cœur) par seconde de tremblement de terre simulé similaire à ceux obtenus auparavant sur d’autres supercalculateurs. La scalabilité quasi-linéaire attendue a été obtenue en exécutant la simulation jusqu’à 10000 process MPI. Une règle heuristique a été déduite des expériences

l’évaluation comparative des modèles numériques <http://sismowine.org>. *HSP1a*, *Can2* et *Can4* ont été réalisés par [23].

précédentes : les performances optimales ont été observées lorsque 10000 hexaèdres, chacun caractérisé par  $N_{GLL} = 5 \times 5 \times 5$ , sont traités par nœud, en considérant une mémoire standard de nœud de 2 Gb.

### 3 Portage du code SEM3D sur instances GCP de type C2D optimisée utilisant processeurs AMD EPYC

Cette section présente les résultats du benchmark SEM3D sur les instances AMD de GCP, effectué par ANEO et CentraleSupélec<sup>3</sup>. Étant donné que le compilateur d'Intel est largement utilisé dans les environnements de calcul intensif, nous avons également souhaité évaluer les performances du compilateur AMD par rapport à celui d'Intel. L'objectif de cette étude est multiple. D'une part, nous souhaitons observer et comprendre le comportement de SEM3D, et comparer les performances des compilateurs Intel (ICC) et des compilateurs C/C++ et Fortran optimisés d'AMD (AOCC) sur les instances AMD de GCP. D'autre part, nous voulions montrer les performances et la scalabilité de SEM3D sur une machine virtuelle (VM) basée sur AMD sur la solution GCP.

Le premier cas d'utilisation consiste en un domaine parallélépipédique simple de dimensions 1200 m  $\times$  1200 m  $\times$  1500 m. Il a été utilisé pour étudier la scalabilité faible où la charge de travail d'un processeur reste constante avec une valeur pratique de 32000 éléments par CPU et un temps de simulation de 0.1 s. Les tests de scalabilité faible ont été réalisés de 1 à 900 cœurs MPI. Un deuxième modèle, plus réaliste, basé sur 1256000 éléments, a été utilisé pour l'analyse de la scalabilité forte. Un temps de simulation de 0.5 seconde a été utilisé pour toutes les exécutions, démarrant de 112 (un nœud) jusqu'à 4032 cœurs (36 nœuds). À titre d'exemple, pour un système composé de 1256000 éléments pour une durée simulée de 0.1 seconde, le coût de la simulation est de l'ordre de 5€, voire de 1€ avec des instances spot. Ce qui ne semble pas déraisonnable compte tenu des durées d'exécution.

Une collection de scripts `bash` a été développée pour gérer le processus. Ces scripts lancent un groupe d'instances du nombre de nœuds requis, configurent l'environnement, effectuent le calcul, puis détruisent le groupe. Les scripts qui gèrent l'infrastructure sont basés sur `gcloud`. Le script de démarrage configure essentiellement la clé SSH et installe les packages. Ensuite, le premier nœud monte le disque persistant, qui est utilisé pour stocker les données d'entrée et l'application, et exporte les données via NFS pour les rendre accessibles aux autres nœuds. Les autres nœuds effectuent ensuite le montage NFS. À la suite de cela, la tâche est initiée, et les résultats sont collectés. Une fois toutes les exécutions terminées, les données de sortie sont récupérées, et les scripts de post-traitement sont exécutés.

Les instances utilisées dans ce travail sont de type `c2d-standard-112`. Ce type d'instance optimisée pour le calcul est basé sur le processeur AMD EPYC de 3e génération, comprend 112 vCPUs, a une capacité de 896 Go de mémoire et une bande passante de sortie par défaut de 32 Gbps. Cette étude a utilisé les trois éléments suivants : un compilateur AOCC version 4.0.0, la bibliothèque AOCL version 4.0 et la version OpenMPI 4.1.4. HDF5 a été compilé avec le compilateur AOCC. Pour la comparaison, SEM3D a aussi été compilé avec Intel oneAPI et Intel MPI en version 2023.2.0.

Figure 3a met en évidence la différence de performances entre les compilateurs Intel et AOCC pour le test de scalabilité faible. Figure 3b montre la même comparaison pour la scalabilité forte. Figure 3a permet de constater que, pour ce cas de test, AOCC est entre 1.30 et 1.36 fois plus performant. Figure 3a montre également que les deux compilateurs présentent le même comportement. Le temps de calcul reste constant sur plusieurs nœuds, tandis que l'utilisation de moins d'un nœud complet augmente le temps de calcul. Cela peut indiquer un surcoût de la communication inter-processeur, des problèmes d'équilibrage de charge, ou le fait que le caching n'est pas pleinement utilisé. Cependant, le test de scalabilité faible suggère que le temps d'exécution de l'application reste constant, car la taille du système et la taille du problème augmentent de manière proportionnelle. Cela indique que SEM3D utilise efficacement les ressources de calcul accrues pour gérer des problèmes de plus grande taille, en maintenant le temps de résolution stable. Autrement dit, puisque le coût de calcul dépend de la taille, cela signifie qu'à nombre d'éléments par CPU constant, le prix de la simulation est proportionnel à la précision requise.

La Figure 3b représente le calcul clé du processus de résolution du problème par itération, multiplié par le nombre de cœurs, en fonction du nombre de cœurs. Comme pour le premier système, AOCC est environ 1.67 fois plus performant. De plus, les résultats montrent un comportement constant lors de

<sup>3</sup>Voir l'article <https://www.aneo.eu/blog/benchmark-sem-instances-google-cloud-c2d-calcul-processeur-amd-epyc>.

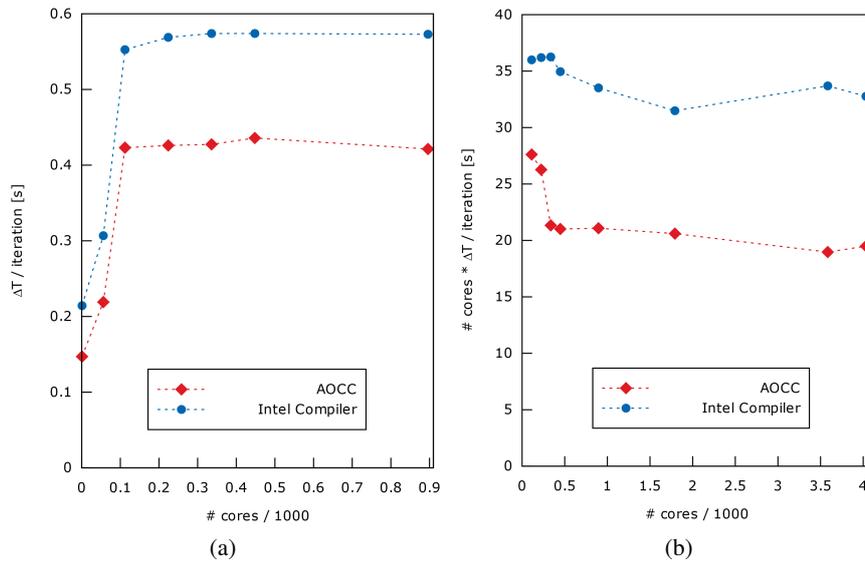


Figure 3: Comparaison entre courbes de scalabilité forte (a) et faible (b) de SEM3D compilé avec Intel oneAPI et AOCC.

l'utilisation de plusieurs nœuds. Étant donné que le coût de calcul dépend du nombre de processeurs demandés pour la simulation, nous constatons que le coût de la simulation reste constant à mesure que le nombre de cœurs augmente. En pratique, cela permet aux utilisateurs d'obtenir des résultats beaucoup plus rapidement sans augmenter la consommation de ressources, que ce soit en termes d'énergie ou d'argent.

## 4 Accélération du code SEM3D via OpenACC

Les Open Hackathons 2023 et 2024 de l'IDRIS<sup>4</sup> nous ont aidé à porter SEM3D sur GPU, en tirant parti d'OpenACC. SEM3D-GPU a été compilé sur les GPU Nvidia A100 et V100 du supercalculateur Jean Zay (IDRIS), avec `nvidia-compilers/24.3`. Les comparaisons préliminaires avec SEM3D sont présentées dans la Figure 4, qui se réfère à un cas de test d'environ 8 millions d'hexaèdres avec 125 points d'intégration chacun ( $\approx 1.5 \cdot 10^9$  DOFs, en supposant 64x3 DOFs uniques par élément).

Deux aspects intéressants peuvent être soulignés : 512 processus MPI sont efficacement remplacés par 8 GPU A100, avec un facteur d'accélération de 3.34. Un autre intérêt du passage à la version GPU réside dans l'augmentation de l'efficacité énergétique du nœud d'un facteur 2.4, avec une économie relativement importante et une réduction des émissions équivalentes de  $CO_2$ , comme le montre la Figure 4. De plus, le profilage `nstight` a révélé que le cas de test occupait 33 GB/GPU A100 node sur Jean Zay. Cela permet d'éviter les limites de la mémoire qui entraveraient l'augmentation de la vitesse.

La Figure 5 montre l'impact des opérations d'I/O : bien que le schéma de marche temporelle se chevauche presque parfaitement (avec des flux asynchrones), les opérations d'I/O (barres rouges dans la Figure 5a) sont des opérations synchrones bloquantes, nécessaires pour sauvegarder les résultats (instantanés).

## 5 Conclusions et Perspectives

L'objectif de ce travail est de tester le code HPC SEM3D sur GCP (en utilisant des instances C2D basées sur des processeurs AMD EPYC) et sa versions GPU, sur GPU Nvidia A100. L'analyse de la version CPU compare les performances obtenues avec les chaînes de compilateurs Intel (ICC) et AMD (AOCC) et la capacité de l'application à passer à l'échelle avec des analyses de scalabilité faible et forte. Le premier retour de cette étude concerne l'utilisation de AOCC : l'adaptation de la chaîne d'outils de

<sup>4</sup>Ce travail a été réalisé en partie lors de l'IDRIS Open Hackathon, dans le cadre du programme Open Hackathons. Les auteurs souhaitent remercier OpenACC-Standard.org pour son soutien.

INPUTS		Runtime (s)	
# CPU Cores	512		1638
# GPUs (A100)	8		490
Application Speedup	3.5x		3.34285714285714
Node Replacement		14.0x	

GPU NODE POWER SAVINGS			
	AMD Dual Rome 7H12	8x A100 80GB SXM4	Power Savings
Compute Power (W)	15,400	6,500	8,900
Networking Power (W)	650	93	557
<b>Total Power (W)</b>	<b>16,050</b>	<b>6,593</b>	<b>9,457</b>
Node Power efficiency		2.4x	

ANNUAL ENERGY SAVINGS PER GPU NODE			
	AMD Dual Rome 7H12	8x A100 80GB SXM4	Power Savings
Compute Power (kWh/year)	134,904	56,940	77,964
Networking Power (kWh/year)	5,695	814	4,881
<b>Total Power (kWh/year)</b>	<b>140,599</b>	<b>57,754</b>	<b>82,845</b>

\$/kWh	\$ 0.34
Annual Cost Savings	\$ 28,167.45
3-year Cost Savings	\$ 84,502.34

Metric Tons of CO <sub>2</sub>	59
Gasoline Cars Driven for 1 year	13
Seedlings Trees grown for 10 years	971

Figure 4: Comparaison entre SEM3D-GPU et SEM3D sur GPU Nvidia A100 (Jean Zay).

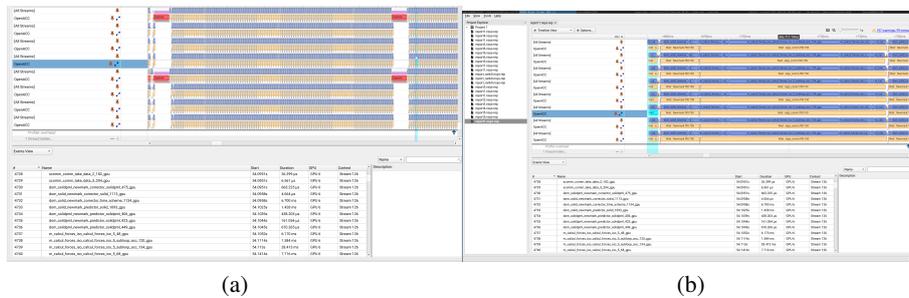


Figure 5: nsight résultats du profilage obtenus pour le cas de test de la Figure 4. Les barres rouges indiquent les opérations d'I/O.

compilation avec AOCC n'a pas posé de problème particulier et a montré un avantage de performance significatif par rapport au compilateur Intel, atteignant un facteur d'accélération d'environ 1,44. Mettre en œuvre la chaîne de compilation AMD permet donc clairement de mieux tirer profit des performances des processeurs AMD. Les données collectées révèlent que SEM3D passe sereinement à l'échelle jusque 4 000 cœurs sur GCP. Cela illustre que GCP est aujourd'hui bien adapté à l'exécution d'application HPC de ce type. De ce fait, le coût d'une simulation ne dépend pas du niveau de performance souhaité mais uniquement de paramètres opérationnels comme la taille de la zone simulée ou la précision souhaitée. Concernant le portage GPU via OpenACC, SEM3D-GPU a un facteur d'accélération de 3.34 par rapport à 512 CPU. De plus, la version GPU est plus performante en terme de consommation énergétique et émissions de CO<sub>2</sub>, avec un gain de 2.4 par rapport à la version CPU. Pour cela, la version SEM3D-GPU est très prometteuse pour l'avenir des machines exascale. Ces tests ouvrent la porte à des analyse paramétrique en utilisant SEM3D et SEM3D-GPU pour mieux anticiper les risques sismiques sur les zones à risques.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé en partie lors de l'Open Hackathon IDRIS 2023 et 2024, qui fait partie du programme Open Hackathons. Les auteurs souhaitent remercier OpenACC-Standard.org pour leur soutien. Ce travail a bénéficié d'un accès aux ressources HPC de l'IDRIS (Institut du développement et des ressources en informatique scientifique) dans le cadre de l'allocation AD010414346, par le consortium GENCI (Grand équipement national de calcul intensif). Les calculs ont également été effectués à l'aide

de ressources HPC du centre de calcul de l'Université Paris Saclay (<http://mesocentre.centralesupelec.fr>), soutenu par CentraleSupélec, l'ENS Paris-Saclay, le CNRS et l'Université Paris-Saclay. Les auteurs remercient également Katherine Bancroft, Patrick Masse, Jean-Claude Benard, Ingrid Einsiedler d'AMD pour leurs conseils et pour avoir fourni les heures de calcul GCP, ainsi que Najate Sarraf et Damien Gouju de Google.

## Références bibliographiques

- [1] CEA and CentraleSupélec and IPGP and CNRS. “SEM3D Ver 2017.04 Registered at French Agency for Protection of Programs (Dépôt APP)”. IDN.FR.001.400009.000.S.P.2018.000.31235. 2017. URL: <https://github.com/sem3d/sem>.
- [2] S. Touhami et al. “SEM3D: A 3D High-Fidelity Numerical Earthquake Simulator for Broadband (0–10 Hz) Seismic Response Prediction at a Regional Scale”. en. In: *Geosciences* 12.3 (Mar. 2022), p. 112. ISSN: 2076-3263. DOI: 10.3390/geosciences12030112. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3263/12/3/112>.
- [3] A. Andrews and P. Folger. *Nuclear power plant design and seismic safety considerations*. Tech. rep. Congressional Research Service, 2012.
- [4] K. Yomogida and J. T. Etgen. “3-D wave propagation in the Los Angeles basin for the Whittier-Narrows earthquake”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 83.5 (1993), pp. 1325–1344.
- [5] S. Tsuboi et al. “Broadband modeling of the 2002 Denali fault earthquake on the Earth Simulator”. In: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 139.3-4 (2003), pp. 305–313. DOI: 10.1016/j.pepi.2003.09.012.
- [6] K. Tsuda et al. “Modeling 3D Velocity Structure in the Fault Region of the 2007 Niigataken Chuetsu-Oki Earthquake with Folding Structure”. In: *4<sup>th</sup> IASPEI/IAEE International Symposium-Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. 2011, pp. 1–11.
- [7] R. Taborda and J. Bielak. “Ground-Motion Simulation and Validation of the 2008 Chino Hills, California, Earthquake”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 103.1 (2013), pp. 131–156. DOI: 10.1785/0120110325. eprint: <http://www.bssaonline.org/content/103/1/131.full.pdf+html>. URL: <http://www.bssaonline.org/content/103/1/131.abstract>.
- [8] M. Villani et al. “High-Resolution Seismic Hazard Analysis in a Complex Geological Configuration: The Case of the Sulmona Basin in Central Italy”. In: *Earthquake Spectra* 3.4 (2014), pp. 1801–1824. DOI: 10.1193/1112911EQS288M.
- [9] R. Paolucci, I. Mazzieri, and C. Smerzini. “Anatomy of strong ground motion: near-source records and 3D physics-based numerical simulations of the Mw 6.0 May 29 2012 Po Plain earthquake, Italy”. In: *Geophysical Journal International* 203 (2015). doi: 10.1093/gji/ggv405, pp. 2001–2020. DOI: 10.1093/gji/ggv405.
- [10] C. Smerzini, K. Pitilakis, and K. Hashemi. “Evaluation of earthquake ground motion and site effects in the Thessaloniki urban area by 3D finite-fault numerical simulations”. In: *Bulletin of Earthquake Engineering* 15.3 (Mar. 2017). doi: 10.1007/s10518-016-9977-5, pp. 787–812. ISSN: 1573-1456. DOI: 10.1007/s10518-016-9977-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9977-5>.
- [11] C. Uphoff et al. “Extreme Scale Multi-physics Simulations of the Tsunamigenic 2004 Sumatra Megathrust Earthquake”. In: *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. SC '17. Denver, Colorado: ACM, 2017, 21:1–21:16. ISBN: 978-1-4503-5114-0. DOI: 10.1145/3126908.3126948. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3126908.3126948>.

- [12] H. Fu et al. “18.9Pflopps Nonlinear Earthquake Simulation on Sunway TaihuLight: Enabling Depiction of 18-Hz and 8-meter Scenarios”. In: *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. SC '17. Denver, Colorado: ACM, 2017, 2:1–2:12. ISBN: 978-1-4503-5114-0. DOI: 10.1145/3126908.3126910. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3126908.3126910>.
- [13] C. Burstedde, L. C. Wilcox, and O. Ghattas. “p4est: Scalable Algorithms for Parallel Adaptive Mesh Refinement on Forests of Octrees”. In: *SIAM Journal on Scientific Computing* 33.3 (2011), pp. 1103–1133. DOI: 10.1137/100791634. eprint: <https://doi.org/10.1137/100791634>. URL: <https://doi.org/10.1137/100791634>.
- [14] K. R. Milner et al. “Toward Physics-Based Nonergodic PSHA: A Prototype Fully Deterministic Seismic Hazard Model for Southern California”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* (2021). DOI: 10.1785/0120200216.
- [15] M. Stupazzini et al. “Physics-based probabilistic seismic hazard and loss assessment in large urban areas: A simplified application to Istanbul”. In: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 50.1 (2021), pp. 99–115. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3365>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eqe.3365>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.3365>.
- [16] F. Gatti et al. “Near-source effects and non-linear site response at Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant, in the 2007 Chuetsu-Oki earthquake: evidence from surface and downhole records and 1D numerical simulations”. In: *Bulletin of Earthquake Engineering* 16.3 (Mar. 2017), pp. 1105–1135. ISSN: 1573-1456. DOI: 10.1007/s10518-017-0255-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0255-y>.
- [17] D. McCallen et al. “EQSIM-A multidisciplinary framework for fault-to-structure earthquake simulations on exascale computers, part II: Regional simulations of building response”. In: *Earthquake Spectra* 0.0 (0), p. 8755293020970980. DOI: 10.1177/8755293020970980. eprint: <https://doi.org/10.1177/8755293020970980>. URL: <https://doi.org/10.1177/8755293020970980>.
- [18] M. Korres et al. “Enhanced Seismic Response Prediction of Critical Structures via 3D Regional Scale Physics-Based Earthquake Simulation”. en. In: *Journal of Earthquake Engineering* 27.3 (Feb. 2023), pp. 546–574. ISSN: 1363-2469, 1559-808X. DOI: 10.1080/13632469.2021.2009061. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13632469.2021.2009061>.
- [19] P. Cupillard et al. “RegSEM: a versatile code based on the spectral element method to compute seismic wave propagation at the regional scale”. In: *Geophysical Journal International* 188.3 (2012). doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05311.x, pp. 1203–1220. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05311.x.
- [20] G. Festa and J.-P. Vilotte. “The Newmark scheme as velocity-stress time-staggering: an efficient PML implementation for spectral element simulations of elastodynamics”. In: *Geophysical Journal International* 161.3 (2005). doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02601.x, pp. 789–812. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02601.x. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-20444501406%7B%5C%7DpartnerID=tZ0tx3y1%20http://gji.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1111/j.1365-246X.2005.02601.x>.
- [21] B. Lombard and J. Piraux. “Numerical modeling of transient two-dimensional viscoelastic waves”. In: *Journal of Computational Physics* 230.15 (2011). doi: 10.1016/j.jcp.2011.04.015, pp. 6099–6114. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.04.015.
- [22] F. Gatti et al. “Investigation of the earthquake ground motion coherence in heterogeneous non-linear soil deposits”. In: *Procedia Engineering* 199.Supplement C (2017). X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2017, pp. 2354–2359. ISSN: 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.232. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817336822>.

- [23] S. Touhami. “Numerical modeling of seismic field and soil interaction : application to the sedimentary basin of Argostoli (Greece)”. 2020UPASC007. PhD thesis. Thèse de doctorat en Génie civil université Paris-Saclay 2020, 2020. URL: <http://www.theses.fr/2020UPASC007>.
- [24] E. Chaljub et al. “3-D numerical simulations of earthquake ground motion in sedimentary basins: testing accuracy through stringent models”. In: *Geophysical Journal International* 201.1 (2015). doi: 10.1093/gji/ggu472, pp. 90–111. DOI: 10.1093/gji/ggu472.