



HAL
open science

Méthode des éléments de frontière pour la mécanique des failles et le contrôle sismique

Laura Bagur, S. Chaillat, Jean-François Semblat, Ioannis Stefanou

► **To cite this version:**

Laura Bagur, S. Chaillat, Jean-François Semblat, Ioannis Stefanou. Méthode des éléments de frontière pour la mécanique des failles et le contrôle sismique. CSMA 2022 - 15ème Colloque National en Calcul des Structures, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], May 2022, Hyères-les-Palmiers, France. hal-03717637

HAL Id: hal-03717637

<https://hal.science/hal-03717637>

Submitted on 8 Jul 2022

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.

Méthode des éléments de frontière pour la mécanique des failles et le contrôle sismique

L. Bagur¹, S. Chaillat¹, J.-F. Semblat²,
I. Stefanou³

¹ Laboratoire POEMS, CNRS - ENSTA-Paris - INRIA Institut Polytechnique de Paris (IP-Paris), {laura.bagur,stephanie.chaillat}@ensta-paris.fr

² Laboratoire IMSIA, CNRS - EDF - CEA - ENSTA Paris IP-Paris, jean-francois.semblat@ensta-paris.fr

³ Laboratoire GEM, Centrale Nantes - Université de Nantes - CNRS, ioannis.stefanou@ec-nantes.fr

Résumé — Ce travail consiste à vérifier numériquement des stratégies de contrôle de séismes par injection de fluide dans le sol. Nous étudions les capacités des méthodes d'éléments de frontière (BEMs) à simuler des séquences de glissements sismiques et asismiques en géomécanique. Un algorithme basé sur les BEMs accélérées par FFT est considéré, validé, et des résultats sont présentés pour un problème simple de mécanique des failles. Les challenges en lien avec l'extension des BEMs accélérées pour incorporer les couplages multi-physiques en jeu sont discutés.

Mots clés — Méthodes d'éléments de frontière (rapides), Mécanique des failles, Contrôle sismique, Sismicité induite.

1 Motivations : vérification de stratégies de contrôle de séismes par injection de fluide

Les séismes naturels ou liés à l'activité humaine causent des dégâts humains et matériels importants. Le développement d'énergies renouvelables comme la géothermie profonde et la séquestration de dioxyde de carbone nécessitent d'injecter une quantité importante de fluide dans la croûte terrestre sans risque de déclencher d'événements sismiques. Cependant, les expériences en cours montrent que des séismes de magnitude modérée à élevée peuvent être induits par ce type d'activités, ce qui remet en question leur innocuité. Tout ceci justifie le besoin d'outils numériques puissants pour modéliser ces séismes. En particulier, des simulations de problèmes en domaines non-bornés faisant cohabiter les échelles de temps propres aux phases sismique (1 s) et asismique (1 an) sont nécessaires pour décrire le phénomène sismique et envisager la réduction de ses effets. Ce travail s'inscrit au sein du projet ERC "Controlling Earthquakes" (CoQuake), porté par Ioannis Stefanou. L'objectif est d'explorer la possibilité de contrôler les séismes naturels et/ou induits par l'activité humaine. Plus précisément, il s'agit d'étudier la possibilité d'imposer un glissement asismique contrôlé au niveau d'une faille, par injection de fluide dans le sol [13], pour la ramener à un niveau d'énergie inférieur et stable.

Ce travail se concentre sur le développement de nouveaux outils numériques basés sur les méthodes d'éléments de frontière rapides (BEMs rapides) [2], [3]. Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux problèmes en domaine non-borné. En effet, elles ne nécessitent pas de tronquer artificiellement le domaine, la condition de radiation étant intrinsèque à la méthode. Cet avantage permet d'envisager des calculs plus réalistes comparativement à d'autres méthodes numériques. Le but des simulations BEMs au sein de CoQuake est précisément de vérifier numériquement et le plus fidèlement possible les stratégies de contrôle de séismes par injection de fluide. Les principales difficultés et originalités résident dans l'extension des BEMs rapides à des problèmes de mécanique des failles de grande taille incorporant des couplages thermo-hydro-mécaniques [12], [8].

2 Démarche existante pour la mécanique des failles

Les BEMs standards, parmi d'autres méthodes numériques, ont déjà été utilisées pour résoudre des problèmes de mécanique des failles [5]. La BEM est basée sur la discrétisation des équations intégrales

de frontière (BIE). Ces équations sont obtenues par reformulation de l'EDP qui régit le problème grâce à l'utilisation d'une fonction de Green. Cette discrétisation conduit à une matrice pleine, une difficulté que l'on peut contourner par l'utilisation des BEMs rapides [2]. Les méthodes accélérées permettent en effet de réduire le coût de calcul et de stockage des BEMs standards. Ces méthodes sont désormais suffisamment matures pour être appliquées à des géométries complexes et à des configurations réalistes mais dans le cadre d'une seule problématique physique.

Afin de vérifier l'approche BEM pour la modélisation de séquences de glissements sismique et asismique, la méthode la plus simple mais également la plus répandue consiste à implémenter des BEMs standards accélérées par FFT spatiale dans le cas simple 2D anti-plan (modèle de [9]). Cette technique n'est valable que pour des cas simplifiés et en particulier pour une faille de géométrie non réaliste.

Dans ce cas simplifié, on considère donc une faille 1D, plane et verticale, chargée en cisaillement (onde SH), et coulissant dans un milieu infini 2D, homogène, élastique linéaire. Les propriétés de la faille associées à son comportement en frottement varient avec la profondeur.

Le problème faisant intervenir un grand nombre de paramètres, nous utilisons le code de couleur suivant pour distinguer les données des inconnues. Les **inconnues** sont notées en **magenta**, les **solutions du problème** sont en **rouge**, et les **paramètres** sont colorés en **bleu**. On suppose un mouvement antiplan en cisaillement de part et d'autre de la faille. Le champ de déplacement de part et d'autre de l'interface est donc porté par \underline{e}_x .

$$\underline{u} = u\underline{e}_x$$

La géométrie du problème est invariante suivant la direction X , le déplacement est donc indépendant de la coordonnée x :

$$u = u(y, z, t)$$

On définit la discontinuité de déplacement (ou glissement) au plan de faille :

$$\delta(z, t) = u(y = 0^+, z, t) - u(y = 0^-, z, t)$$

On néglige les effets dynamiques ainsi que l'intensité de la pesanteur de part et d'autre de l'interface entre les deux blocs de croûte terrestre en $y = 0$. On écrit donc l'équation d'équilibre local suivante en quasi-statique :

$$\text{div}(\underline{\underline{\sigma}}) = \underline{0}, \quad (1)$$

qui se réécrit dans l'hypothèse des petites perturbations, en appliquant la loi de Hooke :

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= \mu \frac{\partial u}{\partial y} & \sigma_{xz} &= \mu \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

L'inertie du système est néanmoins prise en compte via un terme de radiation qui apparaît dans la loi de frottement qui régit le comportement de la faille.

Au niveau du plan de faille $y = 0$ on suppose qu'il y a continuité des composantes en tractions :

$$\underline{\underline{\sigma}}|_{y=0^-} \underline{e}_y = -\underline{\underline{\sigma}}|_{y=0^+} (-\underline{e}_y) \Rightarrow \sigma_{xy}(0^+, z, t) = \sigma_{xy}(0^-, z, t) \hat{=} f(z, t)$$

où $f(z, t)$ est la contrainte de cisaillement due au glissement. L'utilisation de la solution fondamentale de l'équation d'équilibre (1) permet de la reformuler en une équation intégrale de frontière (BIE) [1] entre la contrainte de cisaillement $f(z, t)$ et le glissement $\delta(z, t)$:

$$f(z, t) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{\Gamma} (1/(z - z')) \frac{d\delta}{dz'}(z', t) dz'. \quad (2)$$

Cette BIE s'écrit comme un produit de convolution en espace qui se simplifie, lorsque la géométrie de la faille étudiée est simple, dans l'espace de Fourier :

$$F(\xi, t) = -\frac{\mu|k|}{2} D(\xi, t), \quad k = 2\pi\xi \quad (3)$$

où F et D sont les transformées de Fourier en espace de $f(z, t)$ et de $\delta(z, t)$ respectivement. Enfin une loi de frottement empirique dite rate-and-state régit le comportement en frottement au plan de faille. Il s'agit d'une version régularisée de la loi de frottement rate-and-state proposée par [4] et [11] :

$$\tau(z, t) = \bar{\sigma}(z)a(z) \sinh^{-1} \left[\frac{V(z, t)}{2V_0} \exp \left(\frac{f_0 + b(z) \ln(V_0 \theta(z, t) / L(z))}{a(z)} \right) \right]. \quad (4)$$

Elle est complétée par une loi de vieillissement :

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{V(z, t)\theta(z, t)}{L(z)} \quad (5)$$

où $\tau(z, t)$ est la contrainte de cisaillement globale au plan de faille, $V(z, t) = \frac{\partial \delta}{\partial t}$ est la vitesse de glissement au plan de faille et $\theta(z, t)$ est la variable d'état. La contrainte de cisaillement $\tau(z, t)$ s'écrit comme la somme de trois termes :

$$\tau(z, t) = \tau^0 + f(z, t) - \frac{\mu}{2c} V(z, t) \quad (6)$$

où τ^0 est une précontrainte représentant l'historique du chargement de la faille et $\frac{\mu}{2c} V(z, t)$ est un terme de radiation approchant l'inertie du système. On parle alors de modèle quasi-dynamique. La Table 2 répertorie les définitions des différents paramètres de la loi de frottement rate-and-state.

Pour résoudre ce problème, on s'appuie sur la méthode de prédiction - correction en temps développée par [6] qui utilise la méthode des éléments de frontière spectrale. Il est alors possible de résoudre les équations (4) et (5) en tenant compte de la définition de la vitesse de glissement et de la relation (3) pour obtenir l'évolution spatio-temporelle de $\delta(z, t)$, $V(z, t)$, $\tau(z, t)$ et $\theta(z, t)$. Cette méthode a démontré son efficacité pour résoudre des problèmes de mécanique des failles en 2D et 3D, aussi bien dans un cadre quasi-statique que dynamique. Elle permet d'obtenir la réponse élastique d'une faille soumise à un chargement tectonique lent et de longue durée au cours duquel se produisent des épisodes sismiques très brusques, de courte durée.

Une itération en temps de l'algorithme de résolution comporte les étapes suivantes, on note $\cdot_i(t)$ l'évolution temporelle de la grandeur \cdot en $z_i = i h$:

1. **Calcul du pas de temps courant** : $\Delta t \propto 1 / (\max_{z \in [0, Z_{depth}]} V(z, t))$;
2. **Prédiction** : Connaissant les valeurs du glissement et de variable d'état et de sa dérivée par rapport au temps à l'instant t , on prédit les valeurs de ces inconnues à l'instant $t + \Delta t$:

$$\begin{aligned} \delta_i^*(t + \Delta t) &= \delta_i(t) + \Delta t V_i(t) \\ \theta_i^*(t + \Delta t) &= \theta_i(t) + \Delta t \dot{\theta}_i(t) \end{aligned}$$

3. On en déduit la prédiction de la contrainte de cisaillement due au glissement $f_i^*(t + \Delta t)$ à l'instant $t + \Delta t$ à l'aide des équations (2) and (3) ;
4. Tous les termes de la loi de frottement rate-and-state (4) sont à présent connus à l'instant $t + \Delta t$ sauf la vitesse de glissement. On minimise donc la loi de frottement par rapport à la vitesse de glissement en utilisant la méthode de Newton-Raphson initialisée avec la valeur de la vitesse de glissement à l'instant t , $V_i(t)$. On obtient $V_i^*(t + \Delta t)$;
5. On en déduit la dérivée par rapport au temps de la variable d'état $\dot{\theta}_i^*(t + \Delta t)$ en utilisant la loi de vieillissement;(5).
6. **Correction** : On se rapproche de la solution à partir des quantités précédemment prédites, en recalculant le glissement et la variable d'état :

$$\begin{aligned} \delta_i^{**}(t + \Delta t) &= \delta_i(t) + \frac{\Delta t}{2} (V_i(t) + V_i^*(t + \Delta t)) \\ \theta_i^{**}(t + \Delta t) &= \theta_i(t) + \frac{\Delta t}{2} (\dot{\theta}_i(t) + \dot{\theta}_i^*(t + \Delta t)) \end{aligned}$$

7. On répète l'étape 3. pour calculer $f_i^{**}(t + \Delta t)$, en utilisant les équations (2) et (3) ;
8. De manière similaire à l'étape 4., on calcule $V_i^{**}(t + \Delta t)$ par minimisation de la loi de frottement en prenant $(V_i^*(t + \Delta t) + V_i(t))/2$ pour initialiser la méthode de Newton-Raphson ;

9. On en déduit la dérivée par rapport au temps de la variable d'état $\dot{\theta}_i^{**}(t + \Delta t)$;

10. Enfin les grandeurs ****** donnent les valeurs de $\delta_i(t + \Delta t)$, $\theta_i(t + \Delta t)$, $V_i(t + \Delta t)$ et $\dot{\theta}_i(t + \Delta t)$ à l'instant $t + \Delta t$.

Comme proposé par [6], il apparaît judicieux d'appliquer un changement de variable aux équations (2) (et donc à l'équation (3)) et à l'expression de la contrainte de cisaillement $\tau(z, t)$ dans l'équation (6) (ce qui conditionne l'expression de $\tau^0(z)$) en remplaçant $\delta(z, t)$ par $\delta(z, t) - V_{pl}t$ et $V(z, t)$ par $V(z, t) - V_{pl}$. Ce qui revient à imposer une vitesse nulle au-delà de la faille rate-and-state et donc à avoir des variations nulles de part et d'autre de la distribution de glissement au plan de faille pour les étapes 3 et 7 de l'algorithme.

3 Cas d'une faille plane coulissant dans un milieu semi-infini, linéaire, élastique, isotrope

On considère une faille 1D, plane et verticale, chargée en cisaillement, et coulissant dans un milieu semi-infini 2D, homogène, élastique linéaire Figures 1a, 1b. Les propriétés de la faille associées à son comportement en frottement varient avec la profondeur.

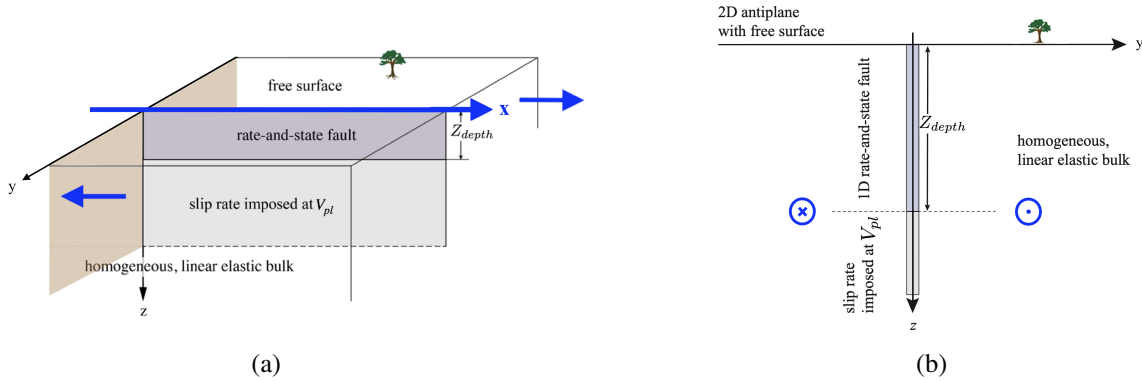


FIGURE 1 – Illustrations (a) 3D et (b) 2D du benchmark (figure initiale issue de https://strike.seec.org/cvws/seas/benchmark_descriptions.html (BP1QD et BP3))

3.1 Validation de la démarche de résolution

Afin de valider la démarche de résolution détaillée plus haut, on considère un cas dans lequel il est possible de déterminer analytiquement la solution. Considérons le cas où la vitesse de glissement reste constante au cours du temps. Sachant que le coefficient de frottement dans la loi de frottement rate-and-state (4) dépend de $V(z, t)$ et de $\theta(z, t)$ et que $V(z, t)$ est calculé par minimisation de cette loi, cela implique que $\theta(z, t)$ soit aussi constant au cours du temps. Donc $\partial\theta(z, t)/\partial t = 0$ et d'après la loi de vieillissement (5) : $1 - V(z, t)\theta(z, t)/L(z) = 0$. On choisit donc les valeurs initiales de $V(z)$ et $\theta(z)$ pour vérifier cette dernière équation. De plus, pour simplifier, on choisit d'initialiser des valeurs de la vitesse de glissement et de la variable d'état constantes quelle que soit la profondeur z considérée. Ceci implique de choisir des valeurs constantes de $\bar{\sigma}$, a , b et L quelle que soit la profondeur z considérée pour être consistant avec la loi de frottement rate-and-state (4) et la loi de vieillissement (5). Partant des valeurs de paramètres (données dans la Table 2) fournies dans le cas du Benchmark proposé dans [6], on fixe les valeurs de $\bar{\sigma}$, a , b et L à leurs valeurs en $z = Z_{depth}$ (voir Figures 2b, 2a et 2c) ainsi que les valeurs initiales $\delta(z, 0)$, $V(z, 0)$, $\tau(z, 0)$ et $\theta(z, 0)$.

Détermination des conditions initiales :

A $t = 0$, on suppose qu'il n'y a pas de glissement

$$\delta(z, 0) = 0.$$

Nous savons d'après les Figures 1a et 1b que la vitesse de glissement initiale est égale à sa valeur imposée au-delà de la partie rate-and-state de la faille :

$$V(z, 0) = V_{pl}.$$

La précontrainte τ^0 correspond à la valeur initiale de la contrainte à $t = 0$, elle est choisie de manière consistante avec la loi de frottement rate-and-state pour les valeurs fixées des paramètres $\bar{\sigma}$, a , b et L .

$$\tau(z, 0) = \tau^0(z) = \bar{\sigma}(Z_{depth})a(Z_{depth}) \sinh^{-1} \left[\frac{V_{pl}}{2V_0} \exp \left(\frac{f_0 + b(Z_{depth}) \ln(V_0/V_{pl})}{a(Z_{depth})} \right) \right].$$

$\theta(z, 0)$ est choisi pour être consistante avec la loi de frottement et avec la vitesse de glissement imposée au-delà de la profondeur Z_{depth} , ce qui correspond à sa valeur en régime stationnaire.

$$\theta(z, 0) = \frac{L(Z_{depth})}{V_0} \exp \left(\frac{a(Z_{depth})}{b(Z_{depth})} \ln \left(\frac{2V_0}{V_{pl}} \sinh \left(\frac{\tau(z, 0)}{a(Z_{depth})\bar{\sigma}} \right) \right) - \frac{f_0}{b(Z_{depth})} \right) = \frac{L(Z_{depth})}{V_{pl}}$$

Cette initialisation vérifie bien les équations (4) et (5).

Dans ces conditions, la solution de référence du problème est donnée par (en ayant en amont appliqué le changement de variable détaillé plus haut) :

- $V(z, t) = V_{pl}$
- $\delta(z, t) = V_{pl}t$
- $\theta(z, t) = L(z = Z_{depth})/V_{pl}$
- $\tau(z, t) = \tau^0(z = Z_{depth})$
- $\dot{\theta}(z, t) = 0$

La Table 1 donne les erreurs obtenues sur l'évolution des quantités $V(z, t)$, $\delta(z, t)$, $\theta(z, t)$, $\tau(z, t)$ et $\dot{\theta}(z, t)$: maximum sur z de l'erreur relative ($\max_z \epsilon_r$) par rapport à la solution analytique précédente prise comme référence pour les quatre premières quantités $V(z, t)$, $\delta(z, t)$, $\theta(z, t)$ et $\tau(z, t)$ et erreur absolue en norme infinie (ϵ_a) par rapport à la solution analytique précédente pour $\dot{\theta}(z, t)$). Le temps final simulé est de 10 ans (avec un pas de temps qui reste constant au cours de la simulation, de l'ordre de 10^3 s). Le reste des paramètres de simulation est fourni dans la Table 3. Ces résultats valident la démarche de résolution mise en œuvre.

Inconnue	Ordre de grandeur de la solution	Erreur
$V(z, t)$	10^{-9} m/s	$\max_z \epsilon_r = 0.0$
$\delta(z, t)$	$\in [0.0, 0.4] \text{ m}$	$\max_z \epsilon_r = 1.5 \cdot 10^{-13}$
$\theta(z, t)$	$4.22 \cdot 10^7 \text{ s}$	$\max_z \epsilon_r = 0.0$
$\tau(z, t)$	$2.22 \cdot 10^7 \text{ Pa}$	$\max_z \epsilon_r = 0.0$
$\dot{\theta}(z, t)$	$5.0 \cdot 10^{-17}$	$\epsilon_a = 5.4 \cdot 10^{-17}$

TABLE 1 – Validation pour le cas $V(z, t)$ constante

3.2 Résolution d'un cas de séquences de glissements sismiques et asismiques

On se place à présent dans le cas où les paramètres associés à la loi de frottement rate-and-state varient avec la profondeur. Ceci va permettre de simuler un cas particulier de séquences de glissements sismique et asismique. La table 2 donne les valeurs des paramètres utilisées pour ce problème.

Détermination des conditions initiales :

A $t = 0$, on suppose qu'il n'y a pas de glissement

$$\delta(z, 0) = 0.$$

Paramètre	Définition	Valeur, Unité
μ	Module de cisaillement	30 GPa
c	Vitesse de l'onde de cisaillement	3000 m/s
$\bar{\sigma}(z)$	Contrainte normale au plan de faille	Figure 2b
$a(z)$	Paramètre rate-and-state	Figure 2a
$b(z)$	Paramètre rate-and-state	Figure 2a
$L(z)$	Distance caractéristique de glissement	Figure 2c
V_{pl}	Vitesse imposée au plan de faille	10^{-9} m/s
V_0	Vitesse de référence	10^{-6} m/s
f_0	coefficient de frottement de référence	0.6
Z_{depth}	Profondeur de la faille rate-and-state	24 km

TABLE 2 – Valeurs des paramètres physiques utilisés pour le Benchmark

D'après les Figures 1a et 1b, nous savons que la vitesse de glissement initiale est égale à sa valeur imposée au-delà de la partie rate-and-state de la faille :

$$V(z, 0) = V_{pl}.$$

La précontrainte τ^0 correspond à la valeur initiale de la contrainte à $t = 0$, elle est choisi de manière consistante avec la loi de frottement rate-and-state

$$\tau(z, 0) = \tau^0(z) = \bar{\sigma}(z)a(z) \sinh^{-1} \left[\frac{V_{pl}}{2V_0} \exp \left(\frac{f_0 + b(z) \ln(V_0/V_{pl})}{a(z)} \right) \right].$$

$\theta(z, 0)$ est choisi pour être consistante avec la loi de frottement et avec la vitesse de glissement imposée au-delà de la profondeur Z_{depth} , ce qui correspond à sa valeur en régime stationnaire.

$$\theta(z, 0) = \frac{L(z)}{V_0} \exp \left(\frac{a(z)}{b(z)} \ln \left(\frac{2V_0}{V_{pl}} \sinh \left(\frac{\tau(z, 0)}{a(z)\bar{\sigma}} \right) \right) - \frac{f_0}{b(z)} \right) = \frac{L(z)}{V_{pl}}$$

Les figures 2a, 2b et 2c montrent l'évolution des paramètres rate-and-state $a(z)$ et $b(z)$, des contraintes normale $\bar{\sigma}(z)$ et initiale $\tau^0(z)$ et de la longueur caractéristique de glissement $L(z)$ avec la profondeur pour un pas d'espace $h = 23.5$ m.

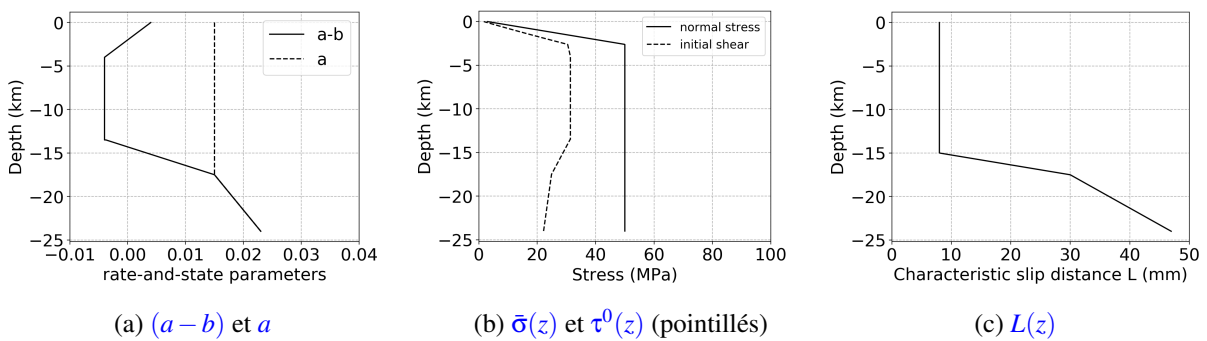


FIGURE 2 – Variations des paramètres avec la profondeur

Traitement des conditions aux limites :

La condition de surface libre (condition de Neumann homogène) est prise en compte par la méthode des images (décrite dans [1] pour l'élastodynamique), qui consiste en une superposition adéquate des solutions fondamentales pour l'espace libre en un point du plan de faille et son symétrique par rapport au plan $z = 0$ afin d'obtenir la solution fondamentale pour le demi-espace.

Résultats numériques :

Les paramètres de simulations correspondant aux résultats numériques présentés dans cette partie sont

donnés dans la Table 3.

Paramètre	Définition	Valeur
t_f	Temps final de simulation	910 ans
Δt	Pas de temps	$\in [10^{-4}, 10^5] s$
h	Pas d'espace	23.5 m
z_{calc}	Troncature de l'axe des z discrétisée	$[-4Z_{depth}, 4Z_{depth}]$
N	Nombre de nœuds de maillage	8192
tol	Tolérance absolue pour la méthode de Newton-Raphson	$1.0 \cdot 10^{-20}$
$rtol$	Tolérance relative pour la méthode de Newton-Raphson	$1.0 \cdot 10^{-20}$
$maxiter$	Nombre maximal d'itérations pour la méthode de Newton-Raphson	100

TABLE 3 – Valeurs des paramètres de simulation utilisés pour le Benchmark

Les résultats ont été exportés entre 420 et 910 ans de simulations, après avoir passé un régime transitoire durant lequel l'amplitude des séismes se stabilise.

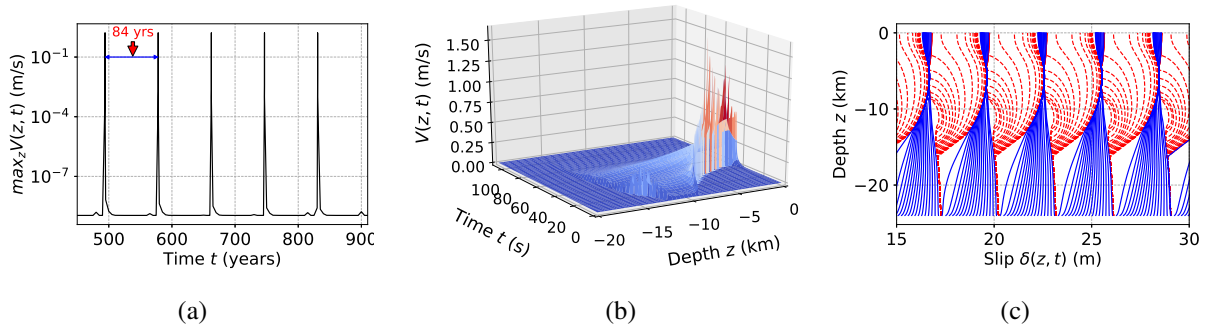


FIGURE 3 – (a) Alternance périodique de phases sismiques et asismique, (b) Évolution spatio-temporelle de $V(z, t)$ pendant une phase sismique, (c) Accumulation du glissement

Les figures 3a, 3b et 3c montrent les résultats obtenus pour l'initialisation proposée en amont et les valeurs des paramètres dans la Table 3. La figure 3a, sur laquelle est tracée l'évolution temporelle du maximum de la vitesse de glissement sur la partie rate-and-state de la faille, rend compte des séquences de glissements sismique et asismique. En effet des phases très brusques avec $\max_{z \in [0, Z_{depth}]} V(z, t)$ de l'ordre de 1.5 m/s alternent avec des phases très lentes correspondant à $\max_{z \in [0, Z_{depth}]} V(z, t)$ de l'ordre de 10^{-9} m/s. La figure 3b permet de caractériser la profondeur à laquelle le séisme se déclenche (à environ 4 km de profondeur ici). Enfin, la figure 3c met également en évidence l'ampleur de chaque phénomène sismique qui en l'espace d'une centaine de secondes (courbe rouges en pointillés exportées toutes les secondes en phase sismique), entraîne une accumulation de glissement comparable au glissement accumulé en phase asismique d'une durée moyenne de 84 ans (courbes bleues en trait plein exportées tous les 5 ans en phase asismique).

4 Conclusions et perspectives

Nous avons ici considéré un algorithme basé sur les BEMs accélérées par FFT dans le cas d'une faille de géométrie simple pour simuler des séquences de glissements sismique et asismique. Nous avons validé et utilisé cette démarche dans le cas d'une faille 1D plane coulissant dans un milieu semi-infini, linéaire, élastique, isotrope. Cette première étape ayant été concluante, nous allons montrer comment il est possible de tirer profit des BEMs rapides en explicitant les changements que cela implique et les gains attendus. L'objectif est de rendre le modèle plus réaliste. Pour ce faire, on prendra d'abord en compte la

dynamique du milieu de part et d'autre de la faille. On considèrera par la suite des géométries de failles plus complexes, des cas de failles (ou réseaux de failles) non planes en 3D. Comme expliqué dans [10], l'approche spectrale présentée ne s'applique que dans le cas d'un milieu supposé élastique de part et d'autre de la faille. Nous utiliserons donc les BEMs rapides pour calculer la contrainte de cisaillement due au glissement dans l'équation (3) dans le cas d'un milieu plus réaliste. Les BEMs rapides sont basées sur des solveurs itératifs et consistent à fournir une approximation creuse de la matrice BEM standard, ce qui permet de diminuer le coup de calcul. Il s'agira ensuite d'étendre les capacités des BEMs rapides en incorporant aux outils développés les couplages multi-physiques en jeu pour tenir compte des effets poro-élastodynamiques (dont [12] a montré qu'il était possible de les modéliser avec les BEMs standards) introduits par l'injection de fluide proche de la faille. Nous prendrons en compte des équations obtenues via des bilans d'énergie et de masse en plus du comportement en frottement. Enfin, nous mènerons une validation des outils développés en comparaison avec des observations sismologiques.

5 Remerciements

Les travaux de recherche de L. Bagur sont financés par un Contrat Doctoral Spécifique Normalien (CDSN) et s'inscrivent dans les thématiques de recherches du projet européen CoQuake (Controlling earthQuakes, www.coquake.eu) financé par le Conseil de Recherche Européen (ERC) sous le European Union's Horizon 2020 research and innovation program (Grant agreement n° 757848 CoQuake).

Références

- [1] M. Bonnet. *Boundary integral equations methods in solids and fluids*, John Wiley and sons, 1999.
- [2] S. Chaillat, M. Bonnet. *Recent advances on the fast multipole accelerated boundary element method for 3D time-harmonic elastodynamics*, Wave Motion, 1090-1104, 2013.
- [3] S. Chaillat, L. Desiderio, P. Ciarlet. *Theory and implementation of \mathcal{H} -matrix based iterative and direct solvers for Helmholtz and elastodynamics oscillatory kernels*, Journal of Computational Physics, 165-186, 2017.
- [4] J. H. Dieterich. *Time-Dependent Friction and the Mechanics of Stick-Slip*, Rock Friction and Earthquake Prediction : Contributions to Current Research in Geophysics (CCRG), (J. D. Byerlee and M. Wyss, 790-806, 2017.
- [5] B. A. Erickson, J. Jiang, M. Barall, N. Lapusta, E. Dunham, R. Harris, L. Abrahams, et al.. *Community Code Verification Exercise for Simulating Sequences of Earthquakes and Aseismic Slip (SEAS)*, Seismological Research Letters, 874-890, 2020.
- [6] N. Lapusta, J. Rice et al.. *Elastodynamic analysis for slow tectonic loading with spontaneous rupture episodes on faults with rate- and state-dependent friction*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 23765-23789, 2000.
- [7] H. Rattez, I. Stefanou, J. Sulem. *The importance of Thermo-Hydro-Mechanical couplings and microstructure to strain localization in 3D continua with application to seismic faults. Part I : Theory and linear stability analysis*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 54-76, 2018.
- [8] H. Rattez, I. Stefanou, J. Sulem., E. Veveakis, T. Poulet. *The importance of Thermo-Hydro-Mechanical couplings and microstructure to strain localization in 3D continua with application to seismic faults. Part II : Numerical implementation and post-bifurcation analysis*, Seismological Research Letters, 1-29, 2018.
- [9] J. R. Rice. *Spatio-temporal complexity of slip on a fault*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 9885-9907, 1993.
- [10] P. Romanet, S. Ozawa. *Fully Dynamic Earthquake Cycle Simulations on a Nonplanar Fault Using the Spectral Boundary Integral Element Method (sBIEM)*, Bulletin of the Seismological Society of America, 2021.
- [11] A. Ruina. *Slip instability and state variable friction laws*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 10359-10370, 1983.
- [12] M. Schanz. *Wave Propagation in Viscoelastic and Poroelastic Continua : A Boundary Element Approach. Vol. 2.*, 2001.
- [13] I. Stefanou. *Controlling Anthropogenic and Natural Seismicity : Insights From Active Stabilization of the Spring-Slider Model*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 8786-8802, 2019.