[Chapitre 18]

# « Évolution(s) » vue(s) par un géophysicien

Nobuaki Fuji
Institut de physique du globe de Paris, Université Paris Cité
Institut Universitaire de France

*Jusqu'à la décomposition, je composerai* (Serge Gainsbourg)

## 1] Évolution – notre Terre

Ces jours-ci, dans ma vie quotidienne, que ce soit lors de mes conférences en sismologie, de discussions avec mes amis au sujet de problèmes écologiques et de l'*avenir*, ou ailleurs, je ne peux m'empêcher de me poser ces questions familières et pourtant fondamentales, et éternelles : D'où venons-nous ? Que sommes-nous ? Où allons-nous ? Pourquoi en sommes-nous arrivés là ? Notre univers est né et a commencé son évolution il y a des milliards d'années, suivi par la formation de notre système solaire, y compris la Terre, bien que cela ait mis quelques milliards d'années de plus. La Terre a commencé à refroidir, en évacuant la chaleur de son intérieur. La convection du manteau est le moteur de toutes les manifestations superficielles actuelles de la Terre, telles que les océans, les continents, les montagnes, les tremblements de terre, etc. La vie a pris naissance à la surface de notre planète, et nous voilà, nous, petits êtres vivants.

Notre planète fournit une force aux créatures de la surface depuis son cœur. Le transfert constant de chaleur et de matériaux du noyau à la surface, et vice versa, fait sans arrêt naître et mourir les plaques tectoniques et la vie au-dessus. Voilà, nous sommes sur un tout petit espace, sur Terre, et pour une très courte période, vivant peut-être les derniers jours glorieux des mammifères. Cependant, la vie dans l'univers continuera à évoluer, et chacun de nous essaiera

18@Eiffel@chap18@OK.indd 1 11/04/2025 14:16

toujours de vivre plus longtemps ou/et plus heureux. L'évolution de l'intérieur des planètes est caractérisée par la convection du manteau (Stevenson 2003, Tosi & Padovan 2020). Nos voisines, la Lune et Mars, ont également connu une histoire de refroidissement par la convection du manteau, qui s'est par la suite arrêtée.

Le manteau terrestre est d'une part réchauffé par la limite noyau-manteau, et d'autre part refroidi par la surface où nous habitons. De plus, ce dernier pourrait expérimenter la circulation de matériaux variés, tels que l'eau et le fer. Comme il est difficile de tracer des éléments volatils, personne ne s'accorde sur la quantité et la distribution de l'eau dans l'intérieur de la Terre, bien que cela affecte considérablement la manière dont se forme la convection (Fuji 2024, Ohtani 2021). Le fer pourrait être entraîné à la base du manteau depuis le noyau liquide et contribuer à la convection mantellique. Alors, la chimie devrait être l'une des composantes importantes de cette histoire.

Dévoiler la grande énigme de l'histoire des corps planétaires commence par l'exploration de l'état actuel de leur intérieur. Étant donné que nous ne pouvons pas descendre au centre des planètes, nous devons appréhender cet intérieur à partir de données de surface. Depuis le premier enregistrement des données de longue distance Tokyo-Potsdam (von Rebeur-Paschwitz 1889), qui a suscité l'espoir grâce aux drôles de zigzags des sismogrammes, la sismologie moderne reste toujours l'un des outils les plus puissants pour imager l'intérieur de la Terre et des planètes. La sismologie globale *écoute* les ondes sismiques, permettant d'obtenir des images de la structure actuelle de la Terre, de Mars et de la Lune avec une précision variable. Plus de 50 000 stations sismiques à large bande sont réparties à la surface de la Terre (**figure 1**), y compris des sismomètres au fond des océans (Kawakatsu 2018) ; tandis que sur Mars, nous n'avons eu qu'une seule station à très large bande (VBB), InSight, pendant deux ans martiens (2018-2022). Il y avait une douzaine de stations à courte période sur la Lune, lors des missions Apollo (jusqu'en 1977) et nous allons maintenant déployer deux stations à large bande dans le bassin Schrödinger sur la face cachée de la Lune en 2025 (FSS : Farside Seismic Suite) et il y en aura d'autres à venir, à la fin des années 2020 (Kawamura *et al.* 2020). Cela nous permettra de mieux comprendre l'intérieur de la Terre et de ses voisines ainsi que leurs évolutions, en analysant les données à venir.

18@Eiffel@chap18@OK.indd 2 11/04/2025 14:16

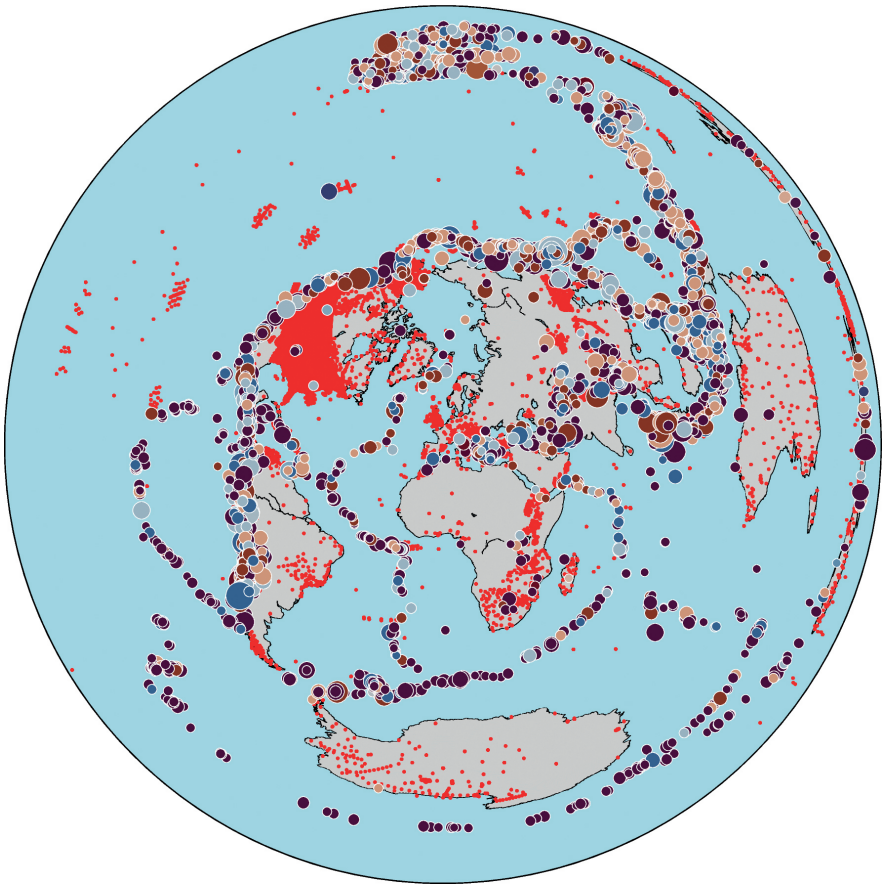


FIGURE 1. Distribution de 46 357 stations disponibles (petits points) et des 5 095 séismes enregistrés dont la magnitude supérieure à Mw~5,5 (en cercle) par des réseaux sismologiques mondiaux (IRIS) entre 2010 et 2020. Les séismes sont colorés selon leur profondeur (plus profond, plus foncé). Le plan est à la projection azimutale équidistante avec le centre à Foix, Ariège.

En tant que sismologue théoricien, je développe des méthodes d'imagerie sismique pour imager la structure, à différentes échelles, des planètes, afin d'extraire le maximum d'information des *chansons* de la Terre et des planètes. Il reste encore de nombreux défis dans la théorie physique et informatique de la sismologie, tant dans les problèmes directs que dans les problèmes inverses, ce qui constitue l'une des attractions de ce domaine. Avec plus de données et des méthodologies plus sophistiquées, en ajoutant davantage de para-

18@Eiffel@chap18@OK.indd 3 11/04/2025 14:16

mètres réalistes (anisotropie, atténuation, densité), nous pourrons améliorer la résolution de notre cartographie en trois dimensions de la Terre et des planètes. Mais attendez ! Une question persiste, néanmoins : *And so what ?*

Cette question est malheureusement pertinente, car, d'un autre côté, les géosciences ont du mal à répondre aux questions simples de type « oui/non » malgré les téraoctets ou les pétaoctets de données sur les formes d'onde sur Terre. L'un des problèmes fondamentaux qui dure depuis longtemps est de savoir si la convection du manteau terrestre est purement thermique (Koelemeijer *et al.* 2018, Schuberth *et al.* 2015) ou si elle est également alimentée par la flottabilité chimique à la limite noyau-manteau (Deschamps *et al.* 2012, 2019, Konishi *et al.* 2020). Ce problème peut être considéré comme un problème inverse (flèche bleu clair vers la gauche sur la figure 2). En termes simples, nous utilisons les formes d'ondes sismiques **d** pour trouver un scénario adéquat **m** parmi deux (purement thermique et thermochimique) qui sont liés à plusieurs opérateurs non-linéaires (filtre de données $\mathcal{F}$, propagation des ondes sismiques $S$, conversion des paramètres pétrologiques $C_D^S$, géodynamique $\mathcal{D}$). Dans le cadre de mes recherches, j'ai amélioré la précision de l'opérateur direct $S$ (Fuji *et al.* 2018) et de son opérateur inverse (Fuji *et al.* 2010, 2012). J'ai également appliqué ces méthodes aux données observées et interprété qualitativement les modèles obtenus à l'aide de $C_{\mathcal{D}}^S$ et $\mathcal{D}$ (Xiao *et al.* 2020, Konishi *et al.* 2020, Fuji *et al.* 2021). Cependant, la non-linéarité des chaînes d'inversions nous empêchera toujours de conclure quantitativement au véritable scénario (**m**).

## 2] Évolution – notre société

Marche funèbre en passacaille, après la guerre de plus d'une demi-heure ; mélancolique, introspectif ou simplement déprimant : le quatrième mouvement de la *Huitième symphonie* de Dimitri Chostakovitch (1943) ; ce n'est visiblement pas simplement un requiem ni un hommage aux morts de la bataille de Stalingrad, si l'on se souvient bien de la Russie soviétique de la fin des années 1930. Désespoir de la vie, désespoir du monde ; ce quatrième mouvement, qui semblait durer éternellement pour nous astreindre à faire face au chagrin et à ressentir des regrets au plus profond de notre cœur, se conclut en proposant un accord mièvre de *do* majeur

18@Eiffel@chap18@OK.indd 4 11/04/2025 14:16

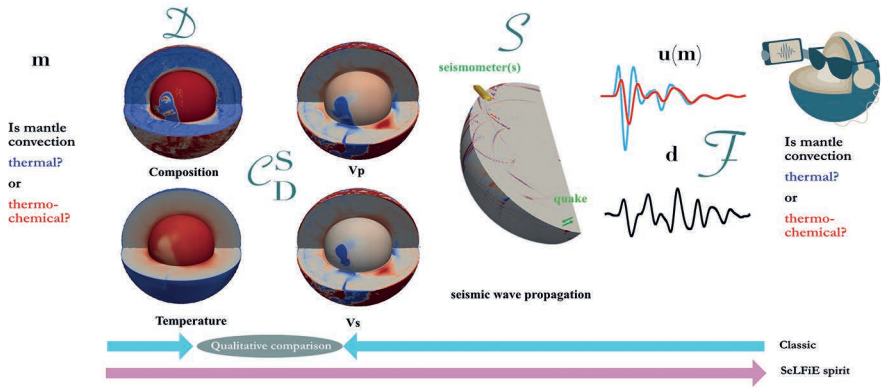



FIGURE 2. Schéma conceptuel de notre stratégie de filtrage sismique faible des formes d'onde (SeLFiE). De gauche à droite : nous générons d'abord ($\mathcal{D}$) des scénarios géodynamiques avec différentes conditions initiales **m** (par exemple, un scénario purement thermique ou thermochimique) afin d'obtenir un instantané à l'heure actuelle (par exemple, 4,6 milliards d'années après la naissance de la planète). Nous traduisons ensuite ($C^{S}_{\mathcal{D}}$) l'ensemble des paramètres géodynamiques tels que la composition et la température en un ensemble de paramètres sismologiques tels que les vitesses des ondes *Vp* et *Vs*. Nous générons ensuite ($S$) des formes d'ondes sismiques **u**(**m**) pour rechercher la sensibilité de par rapport à **m**. Nous définissons un filtre $\mathcal{F}$ qui peut distinguer les différents scénarios **m** : nous analysons ensuite les données observées **d** pour conclure le scénario géodynamique préféré. Les approches classiques tentent d'ajuster les ensembles de paramètres intermédiaires, tels que la structure des vitesses sismiques ou la structure de la porosité, dont les barres d'erreur sont inconnues en raison d'une série de procédures d'inversion.

en pianissimo des clarinettes. C'est un effet soigneusement recherché. N'importe qui peut dire que c'est un hommage sincère à la *Cinquième symphonie* de Ludwig van Beethoven (1808), commençant par la tragédie en *do* mineur, jusqu'au triomphe en *do* majeur. Pourtant, ce n'est pas *tutti* (tout l'orchestre) qui joue en *fortissimo* la joie de la victoire, mais ici au contraire, c'est un petit basson qui rend un soleil invisiblement clair (**figure 3** en bas à gauche). Ce petit appel du soleil, dit « *do-ré-do* », essaie d'illuminer le champ nu ou de calmer les morts. Après deux points d'orgue, le basson commence à développer son discours pastoral, ou même humoristique, autour de ce *do-ré-do*. Cette danse purement bucolique ou sarcastique (au

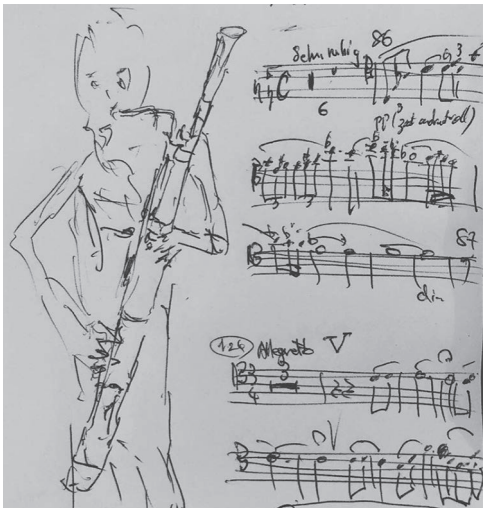


FIGURE 3. Mon basson Püchner (gauche) ; le solo de *Ein Heldenleben* de Richard Strauss (haut) ; le solo du cinquième mouvement de la *Huitième symphonie* de Dmitri Chostakovitch (bas).

choix !) est passée à l'orchestre à cordes, puis au solo violoncelle, au hautbois, à la flûte. Ce cinquième mouvement n'expose que des monologues d'instruments. Il n'y a qu'un seul coup de fanfare de trompettes qui est forcé à rugir la joie de la fin de la guerre. Après d'autres monologues de clarinette basse et violoncelle, le basson marque son *mi* bémol aigu pour recommencer la harangue dansante *do-ré-do*. Ce cri de canard n'est pas encore assez bien étudié chez nous les bassonistes, si on le compare avec le fameux *do* aigu du début du *Sacre du printemps* d'Igor Stravinsky (1913), dont on cherche une beauté extrêmement sauvage. Selon moi, il faut que ce *mi* bémol aigu soit plein de larmes (indiquée *forte subito*), mais en cachant la déchirure derrière la scène, car on ne peut jamais assez l'exposer. Une intervention de la petite flûte suffit pour que cette musique profondément triste promette une paix lointaine : ce sont les contrebasses qui pincent trois fois *do-ré-do* dans un accord pur et assumé de *do* majeur.

Il n'est pas difficile d'imaginer la provocation potentielle qu'a eue cette *Huitième* vis-à-vis de la doctrine Jdanov. Pourtant, l'histoire officielle nous apprend que c'était la symphonie suivante qui a été la cible de la critique de la doctrine : créée en 1945 à Léningrad, cette *Neuvième* avait dû être *la Neuvième*, la *Neuvième* de Beethoven (1824) qui chante la fraternité pendant une heure. Gros orchestre, quatre solistes et un grand chœur ! Contrairement à ce modèle fidèle, Chostakovitch en a écrit pour un petit orchestre littérale-

ment classique, sans chanteurs, durant moins d'une demi-heure. Ici, il la compose aussi pour cinq mouvements, dont le quatrième est dédié complètement au monologue de basson, excepté l'inauguration solennelle de la cour par les procureurs, ou les trombones. Le basson commence sa réponse par « *fa- do-* », exactement comme le début du récit des violoncelles et contrebasses dans la *Neuvième* de Beethoven ou « *O Freunde, nicht diese Töne !* », même en faisant référence aussi à une autre *Neuvième* de Gustav Mahler (1912), son adieu au monde. Ce discours sérieux du basson est suffisamment long pour nous faire oublier des absurdités légères proposées avant le quatrième mouvement de la *Neuvième* de Chostakovitch, puis tout à coup le basson commence à faire le clown au début du cinquième mouvement. Il est remarquable que Chostakovitch essaie de *taquiner* la doctrine toujours avec ce basson. Réfléchi mais comique, ironique et provocateur : j'admire toujours la profondeur de connaissance des instruments de Chostakovitch.

L'hymne à la joie en 1824, le refus de la victoire glorieuse en 1945 ; sans parler de la guerre mondiale, l'évolution de notre société n'a pas toujours l'air d'être dans une direction positive. L'humanité rencontre-t-elle des problèmes de plus en plus sévères ? Il est curieux que la *Huitième* de Chostakovitch (1943) ne laisse plus entrer la masse de bonheur que semblait prétendre la *Cinquième* de Beethoven (1808) même si on peut se dire que les deux musiques commencent par une tragédie terrifiante assez similaire. Ce qui nous donne un peu d'espoir malgré toutes ces analyses, c'est que Chostakovitch a laissé un rayon du soleil *do-ré-do*, en nous disant qu'il y aurait encore un paradis, comme décrit par le concerto pour clarinette de Wolfgang Amadeus Mozart (1791), et qu'il pouvait encore rigoler et se moquer pendant la cérémonie ridiculement majestueuse. Fin d'hypocrisie, on ne peut plus rien cacher mais alors rions du déraisonnable et trinquons ! Si cela s'appelle une *évolution*, il s'agit de la démocratisation de la tristesse. Au fait, l'art était toujours là.

## 3] Évolution – notre science

Face aux histoires et aux énigmes des évolutions de notre planète, nous sommes des moins que rien. Pourtant, notre curiosité est affamée et désire ardemment chercher le secret de l'évolution de cet univers. La science est un art qui essaie de comprendre cette Histoire. Même s'il est naturel de considérer la science de la Terre

et des planètes comme un domaine gouverné par les données, il est parfois pertinent de réfléchir à ce dont on a besoin pour remplir notre appétit de curiosité.

Oui, la science est une œuvre créative. L'imagination intuitive et l'observation doivent dialoguer dans les deux sens. Les observations donnent des indices aux scientifiques et génèrent des idées et des hypothèses sur n'importe quel phénomène dans cet univers, mais les scientifiques sont entièrement libres de proposer des hypothèses, même sans données de départ, et ces hypothèses doivent être testées par rapport aux observations (Fuji 2022). Même si la science de la Terre a été fortement orientée sur l'analyse des données en raison de l'abondance de celles-ci (flèche bleu clair « classique » vers la gauche dans la figure 2). Pourtant, lorsqu'il y a des hypothèses à vérifier (si **m** est petit), le problème inverse devient un problème de classification. Il est alors intéressant d'examiner directement les données sismiques observées **d** par rapport aux données prédites **u**(**m**). Concrètement, nous procédons à une modélisation en chaîne de la géodynamique $\mathcal{D}$ à la sismologie $S$ (flèche rose vers la droite sur la figure 2). J'appelle ce processus « waveform Seismic Low Filtering of Earth's models » (SeLFiE). Nous prenons les signaux sismiques des instantanés des modèles de la Terre générés par anticipation avec ceux de la Terre réelle, comme si nous prenions une photo « selfie » de nous-mêmes. Bien qu'il existe plusieurs études sur la façon dont la technique de tomographie sismologique peut percevoir les modèles géodynamiques (Schuberth *et al*. 2009, 2015, Freissler *et al*. 2020), il y a peu d'études sur la sensibilité de la forme d'onde sismique aux paramètres géodynamiques ou pétrologiques (Cammarano & Romanowicz 2007). Un test pilote de notre méthodologie *SeLFiE* a été encourageant, puisque nous avons utilisé une seule station sismique pour comprendre le mode de transport de la fusion magmatique sous l'île de la Réunion (Franken *et al*. 2020).

Pour passer de plusieurs opérateurs comme la géodynamique, la minéralogie (pétrologie) et la sismologie, nous devons parler *la même langue*. Pourtant, ce n'était jamais facile. Différentes échelles en temps et en espace, différents paramètres dont chaque domaine est sûr ou moins sûr : par exemple la sismologie n'est pas très forte en imagerie de la densité alors que c'est elle qui est la mesure la plus robuste et facile à faire dans le laboratoire. Afin de débloquer cette situation, avec mes collègues J.A. Olive (ENS), L. Le Pourhiet

18@Eiffel@chap18@OK.indd 8 11/04/2025 14:16

(Sorbonne université), M. Marjanović, C. Prigent, C. Le Losq (IPGP), T. Duretz (Université de Francfort) et J. Hernlund (ELSI, Tokyo), j'organise tous les deux ans une semaine de workshop nommée CLEEDI (CoLlaborative Exploration of Earth's Deep Interior). Il est intéressant de préciser que le titre initial de ce workshop lors de sa création était d'abord « Let's talk », puis CASPIP (Collaborative Approaches to Solving Planetary Interior Problems). Cependant, l'arrivée du Covid nous a calmés. Je ne sais pas comment ferait Chostakovitch à notre place, en revanche. Traditionnellement, dans le domaine des sciences de la Terre, il y a eu de grandes conférences internationales, de petits workshops et des écoles d'été ou d'hiver, mais tous ces événements étaient basés sur des présentations orales ou de posters. Ils étaient utiles pour créer des liens sociaux entre les chercheurs, mais les participants n'avaient pas le temps de tester des nouvelles idées et de lancer des collaborations sur place. Ici, nous avons insisté sur la nécessité de « laisser les gens réagir ». L'idée de CLEEDI est de garder une conférence d'une heure, ouverte au grand public pour commencer la matinée, puis les participants sont libres de proposer des projets interdisciplinaires et de travailler dessus pendant la journée. Le workshop CLEEDI a déjà eu lieu deux fois au centre universitaire de l'Ariège, au mois d'août des années 2021 et 2023. Le lundi matin de la première édition (2021) était *quelque chose*. Les participants ont commencé à montrer leurs résultats pour chercher un projet testable dans la semaine. Le fait que beaucoup de projets qui suivent le schéma de la chaîne de problèmes directs (SeLFiE : cf. la section 1) sont nés lors de cette journée m'a bien plu. Cette année (2023), nous avons proposé un projet unique : monter un nouveau code numérique de la propagation des ondes sismiques dans un milieu viscoélastique, écrit principalement par des géodynamiciens (et en Julia !) ! Même si la sismologie et la géodynamique partagent la même équation de Navier-Stokes, l'une la voit en description lagrangienne alors que l'autre, plutôt en eulérienne. Les sismologues pensent optimiser le calcul car nous faisons « confiance » dans l'équation fondamentale alors que les géodynamiciens ont tendance à essayer différentes physiques. Cette expérience a bouleversé la compréhension de la vision de nos voisins : parfois écrire des équations et des codes numériques est une façon plus efficace que de discuter avec des mots pendant des années. Ce n'est pas tous les jours qu'on peut

avoir le temps de comprendre ce que font les autres : cette semaine du workshop CLEEDI dans les montagnes est toujours précieuse. L'esprit SeLFiE a été bien apprécié et le numéro spécial de *Frontiers* pour l'année 2021 est maintenant sorti (Fuji *et al.* 2023).

La musique constitue un aspect unique de l'événement CLEEDI. Je compose plusieurs partitions musicales à partir d'images et de vidéos géophysiques pour donner des concerts de sensibilisation scientifique. Je recrute des musiciens locaux originaires d'Ariège et de Toulouse et, en partenariat avec M. Celma (chef d'orchestre) nous répétons pendant la semaine. Les scientifiques et les musiciens travaillent ensemble pour donner deux concerts en public. En 2023, nous avons joué mon quintette pour basson et cordes *Enigma of the Earth's Evolution*. L'alternance rapide entre les œuvres orchestrales et les discours scientifiques a mis le public à l'aise : les événements sont bien appréciés en Ariège où sont organisés peu d'événements de vulgarisations scientifiques.

## 4] Évolution – notre art (de perception)

L'art est par définition une œuvre créative. Malgré une certaine diversité, les neurologues s'accordent à dire que la puissance de calcul équivalente du cerveau humain est estimée à $10^{16\text{-}28}$ flops (Sandberg & Bostrom 2008), alors que le cluster Fujitsu Fugaku, le plus rapide du monde, en compte ~$10^{18}$ flops. Ce n'est pas seulement par le biais d'une présentation pédagogique classique ou des tweets que nous pouvons communiquer les résultats ou les données scientifiques « de pointe » au grand public. Les images géophysiques sont belles et inspirent le public. Depuis plusieurs années, je travaille sur le « projet PhiloGaïa Orchestra » (Fuji & Meschede 2017, Fuji 2020) dans lequel je compose de la musique inspirée par les images et les vidéos géophysiques et jouée avec elles. Après plusieurs tentatives, je me suis rendu compte que la représentation artistique de la science ne requiert pas nécessairement des explications pédagogiques. En 2017, j'ai composé *Pierre et la Terre* pour l'orchestre, créant l'histoire d'une petite pierre venant du centre de la Terre (Fuji 2017ab). Elle a été jouée en octobre 2017 à l'ambassade de France à Tokyo en présence de Frédérique Vidal puis en novembre 2017 à l'Inalco, puis à l'IPGP. J'ai pu partager le concert à Tokyo avec Frank Iacobucci, un compositeur italien-tokyoïte qui a présenté son extrait de *Muon Symphony*. Nous avons beaucoup échangé lors de la répétition la veille. Iacobucci a constaté que mon

écriture était moins contemporaine que la sienne. Or, pour lui, c'est encore la musique classique qui parle directement au grand public, tandis que les compositeurs contemporains ont du mal à le séduire. La théorie musicale a considérablement évolué (comme le dodécaphonisme d'Arnold Schönberg) tandis que le public n'arrive pas à facilement ressentir des émotions. L'émergence de la musique pop, rock et métal pourrait montrer la conception musicale des humains. Ma réponse était qu'il est probable que la nouvelle génération comprend mieux la musique contemporaine actuelle, comme ça a toujours été le cas dans l'histoire des arts. Par exemple, nous sommes déjà tellement habitués à la modulation de tonalités assez violentes dans la vie quotidienne que nous considérons la musique de Mozart comme la musique naturelle et nous n'avons malheureusement pas la même sensibilité qu'à son époque. Notre perception évolue-t-elle ? Si oui, comment ? Igor Stravinsky a dit : « Ma musique est mieux comprise par les enfants et les animaux. » Je ne sais pas comment l'interpréter dans ce contexte.

*Pierre et la Terre* a ensuite été retravaillée grâce à Jordan Gudefin (chef d'orchestre-compositeur) pour le 100e anniversaire de l'UIGG (Union internationale de géodésie et de géophysique) au siège de l'Unesco en juillet 2019 (Unesco 2019). Puis, j'ai composé une suite pour le sismomètre martien SEIS, InSight (Fuji 2019), basée sur des images dessinées par des étudiants de l'IPGP, des poèmes écrits par Pauline Bonnet (DLR München) et Thomas Ferrand (poète, Institut Langevin) et sur le bruit sismique de Mars. Comme la thèse *Être Terre* en cours (Arthur Enguehard, ENS/ENSADlab), parfois la sonification des bruits sismiques elle-même devient l'objet de l'art. Lors de sa première exposition des résultats de sa résidence artistique consistant en une collecte de bruits sismiques « présentables » enregistrés sur l'Etna, Enguehard m'a avoué qu'il connaît *par cœur* les bruits qu'il a écoutés avec émotion, alors que dans les enregistrements il n'y a que des séismes, des tr**é**mors volcaniques, des bruits de bateaux, ou alors des bruits non identifiables. Pourtant, notre cerveau cherche à valoriser *émotionnellement* cette musique d'origine naturelle qui n'a alors rien à voir avec un morceau composé dans le but de provoquer une émotion intentionnelle.

Ici nous avons une contradiction apparente : la musique intentionnelle ne pourrait parfois pas provoquer d'émotions et la musique des bruits naturels le pourrait.

Je ne suis pas psychologue et il est trop tôt pour que je développe comme ci-dessous, mais si on résume le mécanisme de l'**écoute** de la musique, le schéma est exactement identique au problème inverse posé dans la figure 1. Regardons maintenant la figure 4. Une fois que l'onde acoustique est émise dans l'air, le tympan la reçoit et la cochlée convertit la vibration en signal électrique. Malgré la puissance de calcul de notre cerveau, nous ne pouvons/voulons pas stocker ces données crues, car leur dimension est très large mais la plupart du temps ce n'est pas de ces données dont on a besoin. C'est là qu'on utilise notre filtre ou sensibilité $\mathcal{F}$, qui réduit la dimension de données : nous voulons extraire une impression ou un feeling $\mathcal{F}(\mathbf{d})$. Est-ce joli le solo du basson de la *Huitième* ? Si on est plutôt concerné par la marque de basson, on peut redéfinir le filtre pour ce but. Si on ne connaît pas encore le nom du compositeur, c'est la question qui pourrait nous obséder. Si l'on est intéressé par la vie de Chostakovitch, la question est plus vaste mais c'est le début de la belle rencontre avec ce génie du XX$^{e}$ siècle. Ce qui est important c'est de se poser ces questions **m**. Ici, on commence le problème inverse.

Quelles qu'elles soient, les questions à aborder **m** se relient au résultat **d** par une certaine loi $\mathcal{G}$, qui contient tous les facteurs

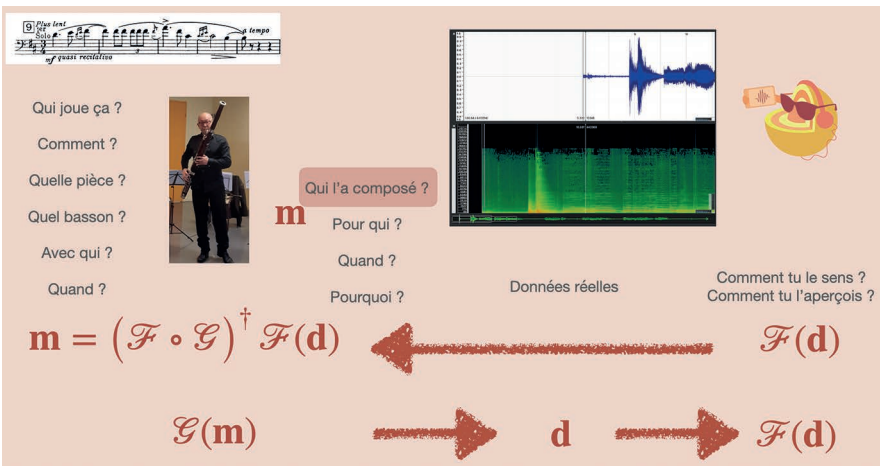



FIGURE 4. Un schéma que j'utilise (j'abuse) souvent pour expliquer les problèmes inverse et direct. Les données (variation de compression en air) elles-mêmes n'ont pas beaucoup de valeur. C'est depuis quand l'observateur sent quelque chose que tout commence. Notez bien que dans la figure 1, $\mathcal{G} = \mathcal{D} \circ C^{S}_{\mathcal{D}} \circ S$.

*a priori* qui ne nous intéressent pas, comme la température de l'air ou l'*éditeur de partition*s, pour des questions posées avant (qui pourraient être **m** dans une autre situation). Soit par imagination dans notre tête, soit par expérience, nous essayons d'*établir* une hypothèse de l'opérateur direct $\mathcal{G}$ ou plutôt $\mathcal{F} \circ \mathcal{G}$, par essais et erreurs. Cela s'appelle le problème direct. Si la question principale était le nom du compositeur, il est conseillé d'écouter plein d'enregistrements de musique classique. Tel compositeur **m**, telle sensation ou émotion $\mathcal{F} \circ \mathcal{G}(\mathbf{m})$. Pour répondre à la question de la vie de Chostakovitch, il nécessite beaucoup plus d'imagination car malgré tout nous ne connaissons pas sa vie entièrement. Une fois qu'on a bien établi/approximé cet opérateur direct, on peut proposer un opérateur pseudo-inverse $\tilde{m} = (\mathcal{F} \circ \mathcal{G})^{\dagger}\mathcal{F}(d)$ qui projette notre feeling pour répondre à la question.

En fait, nous n'avons pas forcément besoin de beaucoup de données si nous avons une bonne sensibilité $\mathcal{F}$ et une bonne estimation de l'opérateur direct $\mathcal{G}$. Cela requiert un bon sens de la physique et un bon sens de l'humanité. En sismologie classique, le feeling $\mathcal{F}(\mathbf{d})$ était un attribut secondaire, comme l'arrivée des ondes ou l'amplitude. Nous essayons d'avoir de meilleures oreilles pour dévoiler l'énigme de l'évolution de notre planète. S'il y a des données sismologiques qui provoquent le sentiment humain, peut-on finalement en profiter ?

## 5] Évolution – la science et/dans l'art

Art en science et art en musique ; peut-on relier de manière transparente l'art et la science ? Le cerveau humain serait-il capable d'aider à répondre à cette question fondamentale : comment notre Terre et les autres planètes ont-elles évolué ? Comme exposé dans la première section, les géosciences classiques ne peuvent à elles seules répondre à cette question oui/non extrêmement mal posée. Je propose ici une hypothèse à tester, basée sur plusieurs études antérieures comme préparation à la science participative : si nous nous immergeons à l'intérieur de modèles virtuels de la Terre avec différents scénarios de convection du manteau (par exemple, thermique et thermochimique) et que nous écoutons les sismogrammes sonifiés de l'ensemble des stations sismiques situées à la surface, pouvons-nous percevoir la différence entre ces scénarios ? Il y a déjà quelques études qui montrent que le système auditif humain a son

potentiel pour la classification des signaux sismiques de stations individuelles (Paté *et al*. 2016, 2021), nous pouvons espérer trouver les attributs sismiques (ensemble de statistiques de formes d'onde) (Sheft *et al*. 2008, Thoret *et al*. 2020). Cet axe à risque devra être exploré dans les années à venir.

## 6] Évolution – ma musique[1]

Lors du travail sur la partition de *Pierre et la Terre*, Jordan Gudefin m'a conseillé d'écrire des morceaux pour quatuor à cordes, puisque c'est la base de la musique classique. Il fallait aussi que cela donne une satisfaction à tous les musiciens, et avec une grande justesse puisque tout s'entend quand on n'est que quatre. Ma soutenance d'habilitation à diriger des recherches en 2022 a été une bonne occasion, surtout car j'avais décidé de ne rien imaginer en particulier (comme d'autres créations de concerts de vulgarisation) en écrivant cette pièce. Nachtmusik (2022) a été donc créée le 28 mars 2022. Il y avait eu le décès de Hitomi Sugawara, mon maître de basson, le 25 février 2022, qui m'a beaucoup attristé, juste après l'invasion de l'Ukraine par la Russie (le 24 février 2022). Je n'ai pas pensé aux images en particulier mais j'avais cherché une ambiance du début du quatrième mouvement « Nachtmusik, Andante amoroso » de la *Septième* de Gustav Mahler (1908). L'accord n'est pas le même. Seulement, j'avais absolument besoin du *fa* continu du violon, pour pleurer, et de la conclusion en accord majeur, pour m'apaiser. Très bizarrement, en référence aux musiques que j'adore, je me suis retrouvé à écrire le petit rayon de soleil *do-ré-do*, mais en tonalité différente (**figure 5**) : en *mi* bémol majeur. Je ne prétends pas que je l'avais calculé mais c'est la tonalité de la *Troisième symphonie* « Héroïque » de Beethoven (1805) ou (bien naturellement) celle de *Une vie de héros* de Richard Strauss (1899, fig. 3). Il n'y a que moi qui fais la musicologie de mes morceaux alors je pourrais dire que le compositeur cherchait un rayon de soleil mais moins naturel avec sa prétention héroïque !

Mon expérience de l'écriture du quatuor est nouvelle. Lors de l'appel à contribution au colloque 2023 de l'IUF, j'ai candidaté pour écrire une nouvelle pièce. Voilà *Enigma of the Earth's Evolution*, le quintette pour basson et cordes, créé dans l'amphithéâtre de l'uni-

[1] Mes compositions se trouvent sur youtube.com/@seismobassoon

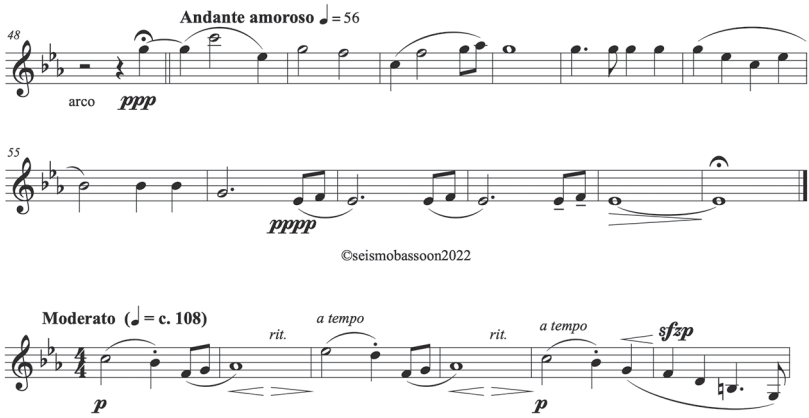



FIGURE 5. haut : la fin de mon premier quatuor à cordes, créé le 28 mars 2022 pour ma soutenance HDR à l'IPGP. Le violon murmure deux fois do-ré-do (puis une fois par le violoncelle) pour donner un rayon de soleil, mais en mi bémol majeur ; bas : le début du quintette pour basson et cordes, créé le 24 mai 2023 pour le colloque de l'IUF « Évolution ».

versité Gustave Eiffel (**figure 5**). Encore une fois, je commence par la tonalité *mi* bémol majeur, mais c'est plutôt pour bénéficier de son effet très obscur. Là-bas, je parle explicitement de ma frustration et de ma joie d'être perdu dans le monde du problème inverse en science de la Terre, face à cette énigme qu'on devrait pouvoir dévoiler petit à petit. Le septième mouvement résume vite les questions à aborder. S'il finit en *do* mineur (la même armure que la tonalité *mi* bémol majeur), il n'y a rien de tragique, mais plutôt, le commencement d'une nouvelle histoire : *To be continued*…

### Références bibliographiques

Cammarano, F. & Romanowicz R. (2007), « Insights into the nature of the transition zone from phyiscally constrained inversion of long-period seismic data », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (22), p. 9139-9144.

Deschamps F., Cobde, L., & Tackle, P. (2012), « The primitive nature of large low shear-wave velocity provinces », *Earth Planetary Science Letters*, 349-350, p. 198-208.

Deschamps F., Konishi K., Fuji N. & Cobden L. (2019), « Radial thermo-chemical structure beneath Western and Northern Pacific from seismic waveform inversion », *Earth and Planetary Science Letters*, 520, p. 153-163.

Franken T., Armitage J., Fuji N., & Fournier A. (2020), « Seismic wave-based constraints on geodynamical processes : an application to partial melting beneath the Réunion island. Geochem », *Geophys. Geosys.*, 21, e2019GC008815.

Freissler R., Zaroli C., Lambotte S., & Schuberth B. (2020), « Tomographic filtering via the generalized inverse : a way to account for seismic data uncertainty », *Geophysical Journal International*, 223, p. 254-269.

Fuji N. (2017), *Peter and the Earth*. Récupéré sur https://www.youtube.com/watch?v=pNwKjXhjaaY

Fuji N. (2017), *Peter and the Earth* (1st edition). Récupéré sur https://u-paris.fr/festival-idees-paris/philogaia-orchestra/

Fuji N. (2019), *Symphonic Suite n° 1 SEIS, InSight*. Récupéré sur https://youtu.be/Vl1etwS2v0Q

Fuji N. (2020), *Composition of the symphonic poem SEIS, InSight No.1, PhiloGaïa Orchestra — from IPGP orchestra to PhiloGaïa Orchestra.* (CIG newsletter) Récupéré sur https://geodynamics.org/cig/index.php!?cID=1311

Fuji N. (2022), *Small-data seismology -from a centimetric rock to Mars-*, Habilitation à diriger les recherches, Université Paris Cité.

Fuji N. (2024), « The interpretation limits of seismological tomography and the possibility of water existence in the Earth's interior », *Developments of Physical Property Measurement Technique under High Pressure*, accepted (Japanese).

Fuji N. (s.d.), *InSight Paris Internationale*. Récupéré sur https://youtu.be/-4VAi1MAtkM

Fuji N., & Meschede M. (2017), « The PhiloGaïa Orchestra projects : we love our planet ! It lives, it sings ! », *The Double Reed*, 40 (2), p. 23-27.

Fuji, N. Chevrot S., Zhao L., Geller R., & Kawai K. (2012), « Finite-frequency structural sensitivities of short-period compressional body waves », *Geophys. J. Int.*, 190, p. 522-540.

Fuji N., Jang H., Nakao A., Kim Y.-H., Fernández-Blanco D., Lee S.-M.,... Konishi K. (2021), « A possible roll-over slab geometry under the Caroline plate imaged by Monte Carlo finite-frequency traveltime inversion of teleseismic SS phases », *Frontiers in Earth Sciences*, 9, 29.

Fuji N., Kawa, K., & Gelle, R. (2010), « A methodology for inversion of broadband seismic waveforms for elastic and anelastic structure and its application to the mantle transition zone beneath the Northwestern Pacific », *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 180, p. 118-137.

Fuji N., Olive J., & Hernlund J. (2023), « Editorial : Collaborative exploration of Earth's deep interiors (CLEEDI) », *Frontiers in Earth Science*, feart.2023.1220375.

Fuji N., Ovcharenko O., Cuvilliez C., & Martin R. (2016), « Simple and accurate operators based on Taylor expansion for 2D elastic seismogram calculation under geological discontinuities with regular Cartesian grids », *Conference Proceedings, 78th EAGE*, doi.org/10.3997/2214-4609.201601665.

Hasegawa K., Fuji N., & Konishi K. (2018), « Improvement of accuracy of the spectral element method for elastic wave computation using modified numerical integration operators », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 342, doi : 10.1016/j. cma.2018.07.025.

Kawakatsu H. (2018), *Pacific Array*, Récupéré sur https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-15K13558

Kawamura T., Lognonné P., Stutzmann E., Drilleau M., de Raucourt S., Fuji N., & *et al.* (2020), *Autonomous Lunar Geophysical Experiment Package (ALGEP)*, récupéré sur https://www.cosmos.esa.int/documents/1866264/3219248/KawamuraT_ESA_Voyage_2050_LunarGeophysicalPackage_v2.pdf/c2c603dc-78d6-9b62-39fa-d15bad7179f6?t=1565184641086

Koelemeijer P., Schuberth B., Davies D., Deuss A., & Ritsema J. (2018), « Constraints on the presence of post-perovskite in Earth's lowermost mantle from tomographic-geodynamic model comparisons », *Earth Planetary Science Letters*, 494, p. 226-238.

Konishi K., Fuji N., & Deschamps F. (2020), « Three-dimensional elastic and anelastic structure of the lowermost mantle beneath the western Pacific from finite-frequency tomography », *J. Geophys. Res.*, 125, e2019JB018089.

Ohtani E. (2021), « Hydration and dehydration in Earth's interior », *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, p. 253-278.

Paté A., Boschi L., Le Carrou J.-L., & Holtzman B. (2016), « Categorization of seismic sources by auditory display : a blind test », *International Journal of Human-Computer Studies*, 85, p. 57-67.

Paté A., Farge G., Holtzman B., Barth A., Poli P., Boschi L., & Karlstrom L. (2021), « Combining audio and visual displays to highlight temporal and spatial seismic pattern », *Journal on Multimodal User Interfaces*, doi : 10.1007/s12193-021-00378-8.

Sandberg A., & Bostrom N. (2008), *Whole brain emulation*, récupéré sur http://www.fhi.ox.ac.uk/brain-emulation-roadmap-report.pdf

Schuberth B., Bunge H.-P., & Ritsema J. (2009), « Tomographic filtering of high-resolution mantle circulation models : can seismic heterogeneity be explained by temperature alone ? », *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10, Q05W03.

Schuberth B., Zaroli, C., & Nolet, G. (2015). Traveltime dispersion in an isotropic elastic mantle : Strong lower mantle signal in differential-frequency residuals. Geophysical Journal International, 203, 2099-2118.

Schuberth, B., Zaroli C., & Nolet G. (2015), « Traveltime dispersion in an isotropic elastic mantle : strong lower mantle signal in differential-frequency residuals », *Geophys. J. Int.*, 203, 2099-2118.

Sheft S., Ardoint M., & Lorenzi C. (2008), « Speech identificatioin based on temporal fine structure cues », *Jounal of Acoustical Society of America*, 124 (1), doi : 10.1121/1.2918540.

Stevenson D. (2003), « Styles of mantle convection and their influence on planetary evolution », *Comptes Rendus Geoscience*, 335, p. 99-111.

Thoret E., Varnet L., Boubenec Y., Férriere R., Le Tourneau F.-M., Krause B., & Lorenzi C. (2020), « Characterizing amplitude and frequency modulation cues in natural soundscapes : a pilot study on four habitats of a biosphere reserve », *Journal of Acoustical Society of America*, 147 (5), p. 3260-3274.

Tosi N., & Padovan S. (2020), « Mercury, Moon, Mars : Surface expressions of mantle convection and interior evolution of stagnant-lid bodies », *Mantle Convection and Surface Expressions, AGU Monograph*, p. 455-490.

Unesco (2019, juillet), « 100e anniversaire de l'Union géodésique et géophysique internationale : célébration de la coopération internationale en sciences de la Terre et de l'espace », récupéré sur https://fr.unesco.org/news/100e-

anniversaire-lunion-geodesique-geophysique-internationale-celebration-cooperation
von Rebeur-Paschwitz E. (1889), « The earthquake of Tokio », April 18, 1889. *Nature*, p. 294-295.
Xiao Z., Fuji N., Iidaka T., Gao Y., Sun X., & Liu Q. (2020), « Seismic structure beneath the Tibetan Plateau from iterative finite-frequency tomography based on ChinArray : new insights iinto the Indo-Asian collision », *Journal of Geeophysical Research, Solid Earth*, 125, e2019JB018344.