



Pascal Bernard

# POURQUOI POURQUOI LA TERRE TREMBLE

Séismes et tsunamis,  
comment les expliquer ?  
Et pourra-t-on un jour les prédire ?

Belin:



Pascal Bernard

# Pourquoi la terre tremble ?

Illustrations de Pascal Bernard

Belin:

Dans la même collection aux éditions Belin

Mathevon N., Viennot É., *La différence des sexes*, 2017.

Tardieu V., *Agriculture connectée*, 2017.

Bonnal C., *Pollution spatiale, l'état d'urgence*, 2016.

Vacquin M., *Frankenstein aujourd'hui, égarements de la science moderne*, 2016.

Jordan-Young R., *Hormones, sexe et cerveau*, 2016.

Danzon M., Charpak Y., *Notre santé dans l'arène politique mondiale*, 2016.

Zito M., *Dans le tourbillon des particules*, 2015.

Urban L., *Sauver les plantes pour sauver l'humanité*, 2015.

Prinzhofer A., Deville É., *Hydrogène naturel. La prochaine révolution énergétique?*  
2015.

Swynghedauw B., *L'homme malade de lui-même*, 2015.

Desmurget M., *L'anti-régime*, 2015.

Tenez-vous informé de nos parutions en vous abonnant  
à la lettre semestrielle et gratuite des « Fous de sciences » :  
[fousdesciences@editions-belin.fr](mailto:fousdesciences@editions-belin.fr)

Ou recevez nos différentes newsletters  
en vous rendant sur le site des éditions Belin  
(rubrique « Restez informés ») : [www.editions-belin.com](http://www.editions-belin.com)

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que « les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » [article L. 122-5] ; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » [article L. 122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© Éditions Belin / Humensis, 2017  
170 bis, boulevard du Montparnasse, 75680 Paris cedex 14

ISBN 978-2-4100-1137-1

## PROLOGUE

Imaginez : vous êtes chez vous, paisible, vous bavardez en famille ou avec des amis, vous rêvassiez dans votre chambre ou devant la télévision, ou bien encore vous prenez une douche ; peut-être, par un hasard extraordinaire, êtes-vous en train de lire ces lignes...

...quand tout à coup, un grondement sourd envahit l'espace ; les objets, le sol, les murs se mettent à vibrer. Un bulldozer dans le couloir ? Non : un séisme ! En quelques secondes, livres et bibelots giclent des étagères, les lampes dégringolent, le téléviseur plonge, les armoires tanguent et basculent. Un vertige vous prend. Tout alentour secoue et geint comme un bateau dans une tempête, malmené par une force monstrueuse et invisible. Debout, vite, la porte. Le sol se dérobe. Chute. Fuite impossible. Encore une seconde et, dans un surcroît de violence aveugle, les murs craquent, s'ouvrent, s'effondrent dans un fracas de fin du monde, entraînant plancher, plafond, étages, toit, et vous-même dans leur chute.

Noir absolu, poussière âcre qui brûle les yeux et la gorge : tout se fige. Vous êtes blessé, hagard, perdu, coincé au creux d'une petite poche d'air entre gravats et meubles défoncés.

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

Vous entendez des plaintes, des appels, des cris. Où sont vos proches? Bientôt plus rien qu'un silence de mort. Fumée d'incendie. Vous ne pouvez plus bouger. Commence une longue attente. En moins de dix secondes, votre vie aura basculé.

Au xx<sup>e</sup> siècle, plus d'un million de personnes, hommes, femmes, enfants, ont ainsi péri sous les décombres, écrasées, étouffées, brûlées, parfois oubliées dans un creux inaccessible et mortes d'épuisement. Des dizaines de millions ont survécu, parfois mutilées, choquées à vie, ayant perdu leur famille, leurs amis, et porteront jusqu'à la fin de leurs jours une terreur indicible de cette terre immobile, si paisible, qui soudain se réveille et détruit.

Rares sont les années sans de telles catastrophes. Elles semblent frapper au hasard, aux quatre coins du globe, rasant des villages, parfois des villes, renversant avec une égale indifférence les vieilles bâtisses décrépies et les immeubles modernes. Cela arrive aussi en France, mais on oublie... Parfois même, l'océan se joint à la furie souterraine, inondant brutalement les côtes de masses d'eau démesurément soulevées.

*24 août 2016, au petit matin. Radios et chaînes télé passent en boucle l'info de la nuit: un séisme de magnitude 6 vient de frapper l'Italie centrale, non loin de Rome. Il y aurait des victimes.*

Dès l'annonce d'un séisme destructeur, les équipes de télévision se précipitent, parfois de l'autre bout du monde, pour offrir au téléspectateur horrifié ces images que vous connaissez bien: sauveteurs improvisés qui déblaient à la pelle, à la main, des monceaux de gravats, pour sauver un de leurs proches; hommes et femmes assis, silencieux, au regard embué et perdu, devant les ruines de leur demeure; chiens au flair extraordinaire, guidant des équipes de sauveteurs sur les montagnes de débris; pelleteuses rugissantes, inquiétantes, dont on ne sait si

## PROLOGUE

elles vont réussir à percer les murailles effondrées qui emprisonnent les occupants, ou bien achever le travail destructeur de la Nature par un coup de pelle maladroit ; hommes courageux, spéléologues improvisés, qui se glissent dans les profondeurs des ruines instables pour aider une victime à se dégager de son trou à rat, au risque d'être surpris par une nouvelle secousse qui pourrait les enfermer pour toujours ; bébés miraculés, sortis indemnes après des jours passés au tréfonds de ce chaos.

*Italie, 24 août 2016 au soir. Bilan provisoire du séisme : plus de 120 morts, plusieurs villages détruits.*

Puis, sur le plateau de télévision, apparaît un scientifique, lui aussi troublé par les images choquantes. Il commente prudemment l'événement : oui, le séisme était prévisible ; mais non, il n'était pas vraiment prévu. Incrusté sur l'écran, un schéma montre l'incontournable tectonique des plaques, avec des flèches, des cartes, la terre qui bouge comme dans un dessin animé ; et la voix-off, trop souvent, dira que les plaques flottent sur du magma et s'entrechoquent en donnant des séismes. Autant de bêtises dont les médias se satisfont, dans l'urgence des actualités. Personne ne prendra le temps d'expliquer ce qui se passe vraiment, personne n'aura vraiment compris pourquoi cela se produit, ni ce que l'on peut faire pour s'en protéger. On s'inquiète plutôt pour les disparus : le bilan des morts augmente chaque jour.

*Italie, 26 août 2016. Le bilan s'alourdit. On compte plus de 250 morts.*

Toujours les mêmes images des villages dévastés et des habitants hébétés, cela accroche sans doute plus le public que les discours scientifiques bien ennuyeux. Le temps télévisé coûte cher, les morts se vendent mieux que la science et ses questionnements.

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

Pourtant, si l'on veut réduire l'impact de ces catastrophes, il ne suffit pas de frapper l'esprit du public avec des images douloureuses. Il faut surtout comprendre ce qui se passe: savoir, pour mieux agir. Si les journalistes n'ont pas les moyens de bien faire ce travail d'information, si l'école n'a pas le temps de s'y attarder, c'est aux scientifiques de s'y frotter, et de faire part de leurs découvertes et de leurs questions encore sans réponses, en s'adressant directement au public.

C'est ainsi que j'ai conçu et remis à jour cet ouvrage, dont la première édition est parue en 2003: révéler au lecteur curieux, aussi simplement que possible, ce que des siècles d'études nous ont appris sur l'origine des catastrophes sismiques, et comment les scientifiques d'aujourd'hui cherchent à résoudre les nombreuses énigmes qui demeurent; mais aussi comment la société, bon an, mal an, tente d'y faire face. En à peine quinze ans, de nombreux séismes ont frappé, détruit, et tué: Algérie et Iran, 2003; Sumatra, 2004; Pakistan, 2005; Chine, 2007; Italie centrale, 2009; Haïti, 2010; Chili, 2010; Japon, 2011; Nouvelle-Zélande, 2011; Népal, 2015; Italie centrale, encore, en 2016; et j'en passe de nombreux autres, moins médiatisés... Ils ont fait plus de 700 000 morts. Les avez-vous déjà oubliés? Pour chacune de ces catastrophes récentes, les analyses scientifiques, développées sur plusieurs années, ont largement contribué à faire avancer la science des séismes, renforçant et affinant certaines théories, en bousculant d'autres, faisant poindre de nouvelles pistes. Dans le même temps, d'autres travaux furent menés à leur rythme propre, par des théories, par des expérimentations et par des instruments nouveaux, et nous ont révélé des processus jusque-là ignorés. Ces bonds récents dans nos connaissances nous aideront-ils à une meilleure protection contre les fureurs telluriques à venir?

PARTIE I

# Tempêtes souterraines



## CHAPITRE 1

# Pré-visions sismiques

La sensation d'un tremblement de terre – même pour un séisme de rien du tout, faisant tout juste tinter les verres et balancer les lampes – est une expérience déroutante, presque métaphysique : quelle force mystérieuse est à l'œuvre dans ce phénomène extraordinaire ? Si l'on dispose de nos jours de nombreuses observations et de théories précises qui en donnent une assez bonne idée, cela n'a évidemment pas toujours été le cas. Comment cette science des séismes s'est-elle constituée ? Comment l'Homme a-t-il appris le fonctionnement d'un mécanisme aussi rare, aussi fugitif, si bien caché sous la terre ? Un saut dans le passé s'impose.

Voici une dizaine de milliers d'années, le développement de l'agriculture fixe les premières grandes sociétés humaines. Des villages puis des cités sont bâtis sur tous les continents. Les séismes, qui n'avaient que peu d'effet sur les huttes en branches, les cabanes en bois ou les habitats troglodytes, commencent alors leur œuvre destructrice sur les ouvrages de pierre ou de

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

terre crue. Recevant à leur occasion du torchis, du plâtre ou des tuiles sur la tête, voire des cheminées, *Homo sapiens* encore peu *sapiens* finit par se poser des questions. Il fallut encore longtemps pour qu'il tentât d'y répondre.

Avançons dans le temps, et posons-nous sur les rivages de la mer Égée, en 500 avant notre ère. Nous sommes au cœur de la Grèce Antique, îles blanches et sèches, mer chaude et ventée, montagnes boisées. Sur la côte ouest, Athènes était alors une petite cité où il faisait sans doute bon vivre – du moins pour les hommes libres. D'autres cités grecques prospéraient au levant, du côté de l'actuelle Turquie. Toutes ces villes avaient ceci de commun : des séismes parfois destructeurs y étaient fréquemment ressentis (figure 1).

Toutefois les gens faisaient avec, divinités à l'appui. Poséidon, dieu colérique des profondeurs marines, était un de ces « fauteurs de séisme », frappant le sol de son trident lors de ses violentes querelles avec Athéna. Engelados, fils des Tartares et de la déesse Terre, chef des Géants, emprisonné sous terre par Athéna qui l'écrasa sous la Sicile, pouvait lui aussi « péter les plombs » et secouer de rage le monde souterrain...

Les philosophes grecs de l'époque rejetaient ces visions populaires de divinités trop humaines. Ils aimaient débattre tout autrement des choses du monde, développant des théories fondées sur quelques principes et sur leurs transformations : l'Eau, le Souffle, le Feu, l'Éther, essences bien plus puissantes que les éléments matériels dont ils s'inspiraient. C'est ainsi que vers les années 600 avant notre ère, dans la prospère cité de Milet, Thalès ne s'intéressait pas qu'aux figures géométriques de ses anciens maîtres égyptiens. Premier savant physiologue de la Grèce antique, il posait l'Eau comme principe physique primordial de la vie et du monde : « à travers l'humidité élémentaire chemine une force divine qui la meut ».

## PRÉ-VISIONS SISMIQUES



1. Mur d'enceinte et colonnes du Temple d'Apollon à Delphes. Les colonnes ont pivoté sur elles-mêmes, et la large fissure du mur, réparée avec des briques, a peut-être elle aussi une origine sismique.

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

Thalès élaborait, entre autres, la théorie la plus ancienne que nous connaissions sur les tremblements de terre. Elle s'est transmise jusqu'à nous, par un résumé qui ne s'embarrasse pas de détails : « La terre repose sur l'eau et y flotte comme un navire ; et lorsqu'on dit que la terre tremble, cela est dû à la mobilité de l'eau. » (Sénèque, *Questions Naturelles*).

Cette affirmation péremptoire lança une vive polémique, et d'autres écoles de pensée virent rapidement le jour. Pendant près de trois siècles, les savants philosophes s'affrontèrent sur le pourquoi et le comment des séismes. Ce ne fut cependant pas qu'un débat d'idées : ces joutes oratoires s'élevaient par l'expérience commune. Pour les tempêtes souterraines, Thalès avait des éléments de preuve : les nombreuses observations de sources qui jaillissaient ou se tarissaient après les séismes. Le premier à oser contredire Thalès fut un de ses élèves, Anaximandre, favorable au principe du Souffle : « Anaximandre affirme que la terre, asséchée par la trop grande sécheresse des chaleurs d'été, ou au contraire après les humidités des pluies, se crevasse en fort profondes fissures, dans lesquelles l'air venu d'en haut s'engouffre violemment et abondamment, et que, secoué par la violence du souffle qui y circule, elle remue sur ses assises. C'est de là que proviennent les tremblements de terre, aux époques où ces sortes d'évaporation se produisent, ou au contraire de trop abondantes chutes de pluie. » (Ammien Marcellin, *Histoire de Rome*).

Anaximène, disciple d'Anaximandre, et moins téméraire que lui, se contente de préciser les théories de son maître sur la question des séismes. Voici ce que rapporte Aristote, dans son fameux ouvrage *Météorologiques* : « Anaximène dit que la terre se brise sous l'effet de l'humidification et de la dessiccation, et que les tremblements de terre sont dus à la chute de ces masses qui tombent après s'être brisées. C'est pourquoi les

tremblements de terre se produisent pendant les sécheresses et de nouveau pendant les grandes pluies ; en effet la terre se brise, ainsi que nous l'avons dit, dans les périodes de sécheresse sous l'effet de la dessiccation et s'effondre lorsqu'elle est excessivement baignée par les eaux de pluie. »

Pour Anaximène, les choses sont donc moins simples : les éléments en action n'engendrent pas directement les séismes, mais sapent les fondements de la terre, conduisant à son effondrement, et provoquant ainsi le tremblement de terre.

Quelque cinquante ans plus tard, Anaxagore met son grain de sel, et propose des représentations encore plus élaborées : l'Éther, principe de toutes choses associé au feu, supportant la terre, et dont la tendance naturelle est à l'élévation, est bloqué dans les profondeurs par l'eau qui remplit les pores et fissures, résultant en une combustion interne, laquelle cause des effondrements souterrains, générant les séismes. Ouf...

D'autres savants s'y mettent, et le débat prend de l'ampleur, car les théories sismiques s'affinent et s'appuient non plus sur la fascination pour un principe mais sur la réalité d'observations spécifiques, judicieusement choisies. Ainsi, deux siècles après Thalès, le grand savant grec Aristote associe lui aussi les tremblements de terre au vent, par un principe commun, le *Pneuma*, exhalaison sèche produite à la fois par le feu interne et par le Soleil. S'échappant du sol, ce *Pneuma* engendre les vents ; pénétrant la terre, il s'y concentre et produit les séismes. Ces circulations sont régulées par les conditions climatiques externes.

Pour défendre cette idée, Aristote invoque une prépondérance des séismes au printemps ou en automne, périodes de sécheresse et de pluie qui perturbent les circulations du *Pneuma*, ainsi qu'à midi ou à minuit, périodes sans vent, signes de son enfouissement dans les sols. Nous savons aujourd'hui que ces coïncidences ne sont pas fondées statistiquement ;

mais Aristote était suffisamment convaincu de la véracité de sa théorie pour s'autoriser à négliger une observation qui n'y obéirait pas, l'exception confirmant la règle... Nous pouvons sourire à cette petite tricherie du grand savant. Cependant, cette propension à ne sélectionner dans les observations que celles qui collent bien à une théorie, et à rejeter les autres, est un des traits les plus constants dans l'histoire de la science! De nos jours, elle reste le travers le plus commun des publications scientifiques. Nous en verrons plus tard quelques exemples.

Aristote a un autre argument pour convaincre de cette place centrale et active du *Pneuma*, et de la passivité de l'eau: c'est bien le vent qui meut les vagues, et non le contraire, dit-il en substance. L'analogie est puissante, et il ne devait pas faire bon s'opposer au professeur...

Ainsi, après trois siècles de débats, les dieux de l'Olympe sont mis à la porte. Toutefois, le principe des causes sismiques, qu'il soit l'Éther, le *Pneuma*, l'Eau ou le Feu, semble plutôt arbitraire, et les observations rapportées à l'appui de chaque thèse sont moins des démonstrations qu'un support à l'intuition. Contemporain de ces débats, le philosophe Épicure en a bien conscience. Il se dégage habilement d'une polémique qu'il juge vaine, en invitant à ne rejeter aucune des représentations proposées. Le phénomène qu'elles décrivent étant inaccessible à nos sens, nul ne peut savoir où gît la vérité. Seule l'acceptation de la pluralité des théories est le gage de la tranquillité d'esprit. Ne vous prenez donc pas la tête...

Peu à peu, la science quitta le monde égéen et fleurit plus à l'ouest, au cœur de l'Empire romain. Là-bas, et pour de nombreux siècles, les savants ne firent que reprendre et discuter les mêmes théories, sans ouvrir de nouvelles pistes: chaque Élément correspondait à un phénomène, toutes les bonnes idées étaient formulées, et la Terre était toujours aussi opaque

et impénétrable. De surcroît, ces savants n'avaient plus tant de grain à moudre, la campagne romaine et ses provinces étaient moins sismiques que l'archipel hellénique. Les séismes destructeurs y étant plus rares, les développements savants à leur propos ne motivaient personne, et leurs occurrences étaient associées, tout comme en Grèce, aux mauvaises humeurs de quelque dieu. Ainsi, Lucrèce, contemporain de l'empereur Cicéron, prend comme seul exemple, dans son extraordinaire ouvrage *De rerum natura*, un séisme vieux de trois siècles qui fit disparaître la ville grecque d'Helike sous les eaux du golfe de Corinthe; il n'en connaissait les effets que par les écrits de seconde main des Anciens et de géographes comme Strabon. Quand à Sénèque, dans ses *Questions Naturelles*, il ne cite que le séisme de Campanie, en l'an 62, qui ébranla Pompéi peu avant l'éruption catastrophique du Vésuve qui ensevelit la ville.

L'idée-force de ces représentations de l'activité sismique, qui fleurirent dans le monde antique occidental, est donc celle d'une terre caverneuse et passive, parcourue par des fluides ou principes actifs causant ses ébranlements. Ces images ne purent résister au développement de la chrétienté, qui ne reconnaissait qu'un principe divin, et point de lois naturelles. Elles furent même déclarées hérétiques! À la fin du iv<sup>e</sup> siècle, Philastrius, évêque de Brescia, inscrit comme hérésie numéro 102, dans son *Liber de Haeresibus*, la croyance en des causes naturelles à l'origine des séismes. Quelques voix s'élèvent pourtant parmi les érudits du Moyen Âge, redécouvrant la pensée antique dans les livres soigneusement préservés et recopiés. Ainsi, au vi<sup>e</sup> siècle, l'encyclopédiste Isidore de Séville réconcilie les théories antiques en mettant tous les principes à l'œuvre, pêle-mêle: les vents d'Aristote causent non seulement les séismes, mais aussi, en même temps, les effondrements et les mouvements d'eau souterrains...

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

Cependant, la figure allégorique du souffle de Dieu finit par masquer la vision naturaliste des vents : pendant près d'un millénaire, les séismes furent interprétés avant tout comme des messages divins, représentations de la fin du monde.

### *Fluide électrique ou machine à vapeur?*

Fin du xvi<sup>e</sup> siècle. La science pointe son nez, mais les églises restent vigilantes. Le grand physicien Galilée, précurseur de la science expérimentale, restait perplexe sur la question des séismes, pour laquelle aucune expérience, aucune mesure ne semblait envisageable. À tel point qu'il nota, prudent : « doit-on penser que la cause des séismes doit être au-dessus, ou sous la terre ? » La question est à l'ordre du jour dans l'agenda scientifique de l'époque : en 1556, lors du grand séisme de Constantinople, les habitants de la ville n'avaient-ils pas observé une grande comète, ainsi qu'une constellation inhabituelle d'étoiles ?

Encore un siècle, et nous voici au début du xviii<sup>e</sup>. Les choses commencent à bouger sur la question des séismes, et tout d'abord par un texte visionnaire du géologue anglais Robert Hooke. En 1705, reprenant les écrits des Anciens et leurs observations des effets des séismes, Hooke associe la formation des montagnes à l'effet des tremblements de terre, qu'il déduit de l'observation de fossiles marins en altitude : « Ces phénomènes et plusieurs autres peuvent avoir été produits par des tremblements de terre, catastrophes qui ont converti les plaines en montagne, et les montagnes en plaine, les mers en continents et les continents en mers, qui ont fait couler des rivières là où il n'y en a jamais eu, en ont absorbé d'autres qui existaient depuis longtemps ; et qui, depuis la création du monde, ont opéré des changements nombreux sur la surface de la terre, et ont été les moyens à l'aide



2. Destruction de Lisbonne lors du séisme de 1755.

desquels les coquilles, les ossements, les poissons, et autres corps analogues se sont trouvés placés dans les lieux où, à notre grand étonnement, nous les trouvons aujourd'hui.»

Toutefois, c'est surtout l'expérience de deux catastrophes sismiques, à Lisbonne en 1755 (figure 2), et en Calabre en 1783, causant la mort de près de 100 000 personnes, qui incita quelques poignées de savants curieux à mener leurs enquêtes et à interroger la Nature, lançant enfin une réflexion de fond sur la cause des séismes.

Lisbonne, riche capitale du Portugal, sanctuaire des arts, porte des conquêtes océanes. Premier novembre 1755, jour de la Toussaint, dix heures du matin. Un grondement sourd se fait

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

entendre, le sol vibre. Après une dizaine de secondes, les tremblements deviennent si violents que des centaines, des milliers d'immeubles se fissurent et s'effondrent sur leurs habitants. Des incendies se déclarent un peu partout dans la ville. Pour achever ce tableau d'apocalypse, une série de vagues monstrueuses, hautes de 30 mètres en certains endroits, balayent et engloutissent le port et la partie basse de la ville. Des dizaines de milliers de morts. La puissance du séisme est telle qu'il va jusqu'à troubler l'eau des fontaines des villages provençaux, et agite les grands lacs du nord de l'Europe, jusqu'au Loch Ness... Ce séisme frappe les esprits dans l'Europe des Lumières : la Nature, que certains philosophes de l'époque imaginaient bienfaisante, harmonieuse, propice au progrès de l'humanité, n'était apparemment pas si bonne que cela... Choqué, Voltaire écrit en 1756 un poème sur le désastre :

« Philosophes trompés, qui criez : « tout est bien »,  
Accourez : contemplez ces ruines affreuses,  
Ces débris, ces lambeaux, ces cendres malheureuses.  
Ces femmes, ces enfants, l'un sur l'autre entassés  
Sous ces marbres rompus, ces membres dispersés ;  
Cent mille infortunés que la terre dévore,  
Qui sanglants, déchirés, et palpitant encore,  
Enterrés sous leurs toits, terminent sans secours  
Dans l'horreur des tourments leurs lamentables jours ? »

C'est à l'homme, par la raison, d'assumer sa condition face à un mal aveugle, sans Dieu ni Providence. Toute la communauté savante de l'époque se dépêche sur place, constate les effets avec effroi, mais rien ne transparait de ce qui aurait pu causer ces vibrations, ni cette vague.

Dans un essai sur les causes de cette catastrophe, en 1760, John Michell, physicien et géologue anglais, reprit le modèle antique des cavernes et fissures en y ajoutant les images inspirées par la puissance des machines à vapeur, développées depuis plus

d'un demi-siècle : les séismes résultaient des effets de piston d'une vapeur d'eau chauffée dans les roches incandescentes, engendrant la rupture des strates géologiques et la propagation de la commotion à grande distance. Une idée bien partagée à l'époque, et soutenue en particulier par le savant français Pierre Bouguer. Le philosophe Emmanuel Kant discute plus avant cette explication, imaginant une veine de feu se propageant à grande vitesse dans le sous-sol de toute l'Europe, initiée par le déversement soudain d'eau de mer sur les substances minérales incandescentes de gigantesques cavités souterraines, suite à l'ouverture de petites brèches dans le fond de la mer au large de Lisbonne.

En 1766, le grand savant naturaliste français Georges de Buffon précisait ces idées dans sa preuve proposée dans la *Théorie de la Terre*, critiquant au passage la théorie de Hooke : « Je ne vois pas trop comment on peut croire que les tremblements de terre ont pu produire des montagnes, puisque la cause même de ces tremblements sont des matières minérales et sulfureuses qui ne se trouvent ordinairement que dans les fentes perpendiculaires des montagnes et dans les autres cavités de la Terre, dont le plus grand nombre a été produit par les eaux ; que ces matières en s'enflammant ne produisent qu'une explosion momentanée et des vents violents qui suivent les routes souterraines des eaux ; que la durée des tremblements n'est en effet que momentanée ; et que par conséquent leur cause n'est qu'une explosion et non pas un incendie durable, et qu'enfin ces tremblements qui ébranlent un grand espace, et qui s'étendent à des distances très considérables, bien loin d'élever des montagnes, ne soulèvent pas la terre d'une quantité sensible, et ne produisent pas la plus petite colline dans toute la longueur de leur cours. »

À la même époque, inspirés par les découvertes de Benjamin Franklin sur l'électricité atmosphérique, nombre de savants,

comme le révérend anglais William Stukeley, proposèrent une origine électrique des séismes. Cette théorie avait également ses arguments. Dans son ouvrage *Philosophie des séismes*, Stukeley faisait observer que les séismes avaient lieu surtout lorsque le temps était sec et chaud, et se localisaient plutôt dans les régions méridionales : la sécheresse est la condition nécessaire à l'accumulation de fortes charges électriques à la surface de la Terre. En second lieu, il notait que les rivières et la mer pouvaient canaliser au loin le fluide électrique, ce qui expliquait la prépondérance des dommages observés sur leurs rives. L'abbé Berthelon, physicien passionné de phénomènes électrostatiques, reprit cette idée et proposa en 1779 un système de tiges métalliques enfoncées dans le sol pour en extraire le fluide électrique, sortes de paratonnerres inversés.

Un Italien, A. Filomarino, Duca della Torre, fut séduit par cette théorie. Profitant d'une éruption du Vésuve, vers 1780, il prit l'habitude de promener son électromètre – sorte de petit pendule métallique à deux branches – sur les pentes du volcan, afin de prouver l'origine électrique des éruptions et des séismes. S'il ne détecta pas d'effet électrique, son électromètre se révéla toutefois un excellent détecteur de vibration. L'Italien revint donc de ces expéditions avec l'idée d'un des premiers sismographes, qu'il put réaliser dans les années 1790 : constitué d'un pendule vertical prolongé d'un crayon, couplé à une horloge, il inscrivait ses mouvements sur un disque de papier ; mais l'horloge semble n'avoir jamais fonctionné...

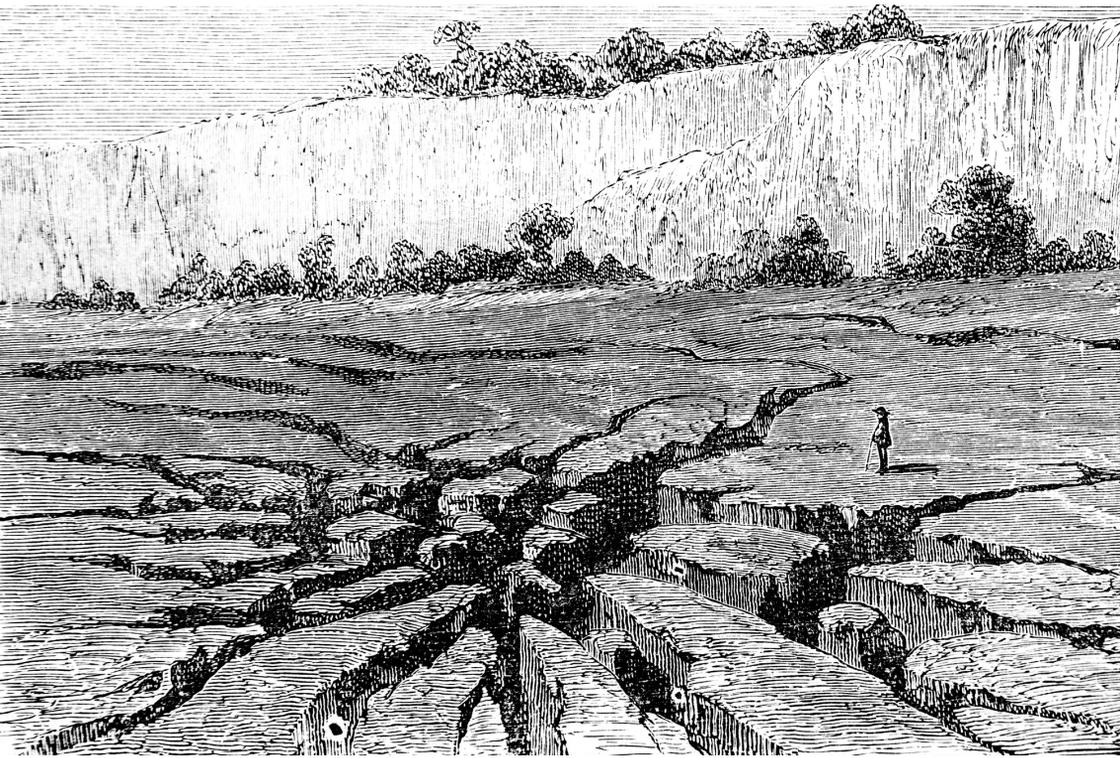
À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, la formidable *Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert (1782) fait le point sur les diverses théories dominantes, leurs hypothèses, anciennes alliances de l'eau, de l'air et du feu : « On ne peut douter que la terre ne contienne une quantité d'air assez grande pour que les matières susceptibles de s'enflammer puissent prendre feu ; ce même air qui est entré

peu à peu, est mis en expansion; les écroulements de terre qui se sont faits au commencement de l'inflammation qui a dû miner et excaver peu à peu les rochers, empêchent que l'air ne trouve d'issue; alors aidé de l'action du feu qu'il a allumé, il fait effort en tous sens pour s'ouvrir un passage; et ses efforts sont proportionnés à la quantité des matières embrasées, au volume de l'air qui a été mis en expansion, et à la résistance que lui opposent les roches qui l'environnent. Personne n'ignore les effets prodigieux que l'air peut produire en cet état. [...] À l'égard de l'eau, toutes les observations prouvent que la Terre en contient une quantité prodigieuse. [...] L'eau contenue dans les profondeurs de la Terre, peut contribuer de plusieurs manières aux tremblements de terre: 1) l'action du feu réduit l'eau en vapeurs, et pour peu que l'on ait de connaissance en physique, on saura que rien n'approche de la force irrésistible de ces vapeurs mises en expansion, lorsqu'elles n'ont point d'issue. [...]; comme elle ne trouve aucun passage pour s'échapper, elle soulève les rochers qui l'environnent, et par là elle produit des ébranlements violents qui se font sentir à des distances incroyables; 2) l'eau produira encore des effets prodigieux, lorsqu'elle viendra à tomber tout d'un coup dans les amas de matière embrasée; c'est alors qu'il se fera des explosions terribles. 3) les eaux peuvent encore contribuer à animer les feux souterrains, en ce que par leur chute, elles agitent l'air, et font la fonction de soufflets de forge... 4) enfin, l'eau peut encore concourir aux ébranlements de la terre par les excavations qu'elle fait dans son intérieur, par les couches qu'elle entraîne après les avoir détrempées, et par les chutes et écroulements que par là elle occasionne. On voit de tout ce qui précède, que les tremblements de terre et les volcans, ou montagnes qui jettent du feu, sont dus aux mêmes causes; en effet les volcans ne peuvent être regardés que comme les soupiraux ou les cheminées des foyers qui produisent les tremblements de terre.»

De l'autre côté de la Manche, l'édition de 1774 de *L'Encyclopaedia* de Ephraïm Chambers, rédigée dans le même esprit, fait aussi le point sur les séismes – à sa façon : « Les tremblements de terre ont fréquemment eu lieu sans aucune éruption de feu, de vapeur, de fumée, ni d'odeurs, ce qui est totalement incompatible avec l'hypothèse d'une quelconque vapeur souterraine à leur origine. »

Ce petit texte a dû crisper quelque savant français ! *L'Encyclopédia* va même plus loin dans la polémique, puisqu'elle propose l'explication électrique de l'Anglais Stukeley comme la seule défendable. En juste retour, cela ne vous aura pas échappé, cette dernière n'est même pas mentionnée dans la version française... ce qui n'a pas dû plaire aux confrères anglais.

À peine un an après la sortie de *L'Encyclopaedia*, le 5 février 1783, survient un deuxième choc en Calabre, dans le sud de l'Italie. Sans aucun signe avant-coureur, des villages entiers sont détruits en moins de 20 secondes, et la ville de Messine est touchée. L'Europe alertée envoie des secours et des vivres. Les savants géologues enquêtent sur place. Au contraire du séisme de Lisbonne, ils découvrent cette fois-ci, dans les lieux les plus touchés, un sol fracturé, bouleversé, effondré par endroits (figure 3). La Nature semble enfin se dévoiler. Mais ces témoins de roches fracassées sont-ils des causes ou des conséquences du choc ? Nul ne pouvait encore le dire... Malgré tout, à propos de cet événement, le grand géologue écossais Charles Lyell, dont nous reparlerons, notait un demi-siècle plus tard : « L'importance de ce séisme provient du fait que la Calabre fut jusqu'à présent le seul lieu visité tant pendant qu'après les convulsions sismiques par des hommes possédant assez de loisirs, de zèle et de connaissances scientifiques, pour être capables de collecter et de décrire avec précision les faits physiques qui mirent en lumière les questions géologiques. »



3. Fracturations du sol rocheux lors du séisme de Calabre de 1783.

### *La naissance des montagnes*

Quelles étaient donc ces questions géologiques ? Elles dépassaient largement la question des séismes, bien sûr, et touchaient à l'origine des roches et des strates terrestres. À l'époque, comme aujourd'hui, le spectacle des montagnes, des volcans, des séismes et des fossiles d'espèces disparues avait de quoi fasciner un esprit curieux. Les falaises ou les fronts de taille de carrières, zébrées de fractures et de veines (figure 4), dévoilent

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?



4. Pli-faille de Suerme (Bugey). Bancs de calcaire massif du Jurassique, plissés, faillés, et déversés vers l'est par une compression orientée est-ouest.

les plis et brisures des couches géologiques, que l'on peut même traquer sur les parois des mines ou des galeries souterraines. De quel passé révolu, cataclysmique, sont-ils la marque ?

Devant le spectacle chahuté et grandiose du monde géologique, mais aussi poussés par l'aiguillon économique du développement minier, les savants chimistes du XVIII<sup>e</sup> siècle se laissèrent tenter par un projet titanesque : reconstituer l'histoire de la Terre sur laquelle nous marchons tous les jours, et élaborer sa théorie scientifique.

Une première grande théorie, dite « neptunienne », élaborée par un minéralogiste prussien, Abraham Werner, naquit dans les années 1770. Werner décrivait la formation des roches par précipitation de cristaux dans un océan primordial, à l'origine des couches géologiques, comme le sel gemme se dépose au fond des marais salants. L'inclinaison de strates était liée à des dépôts sur des fonds irréguliers, et les plissements et brisures

étaient la conséquence d'anciens glissements sous-marins. Outre ses explications géométriques et minérales, cette théorie présentait l'avantage de s'accommoder d'une vision biblique de l'histoire du monde, avec son Déluge, pour la plus grande satisfaction des églises chrétiennes.

Toutefois, à peine développée, cette théorie fut attaquée par un chimiste écossais, James Hutton, qui proposa dès 1785 sa théorie « plutonienne » : les roches auraient une origine ignée – forgée par le « feu » interne (*ignis*, en latin) – et proviendrait des profondeurs de la Terre. Les plissements et soulèvements spectaculaires des strates seraient la marque d'un processus lent et continu, sous l'effet de la chaleur interne – et non pas celle d'une catastrophe originelle et sous-marine. Sur ce dernier point, Hutton s'inspirait directement des théories de Hooke, émises un siècle auparavant, sur les changements graduels du monde. Ainsi, sur la question des séismes, il écrivait : « Un volcan doit être considéré comme un soupirail des fourneaux souterrains, pour éviter le soulèvement excessif des terres, et les effets destructeurs des séismes. »

Le conflit entre plutoniens et neptuniens lança les partisans des deux camps sur le terrain, à la recherche de preuves pour confondre l'adversaire. Au tout début du XIX<sup>e</sup> siècle, grâce à une moisson d'observations géologiques, les théories neptuniennes ont décliné face aux théories de Hutton. En même temps naquit une nouvelle pensée géologique, le « catastrophisme », qui interprétait les inclinaisons et les plis des strates de sédiments, ainsi que les extinctions d'espèces fossiles, par des épisodes cataclysmiques et rares de l'histoire géologique, telle que la poussée supposée soudaine des Alpes ou des Andes. Les catastrophistes s'opposaient donc aux thèses de Hutton, reprises par le géologue écossais Charles Lyell, sur les changements graduels de la croûte terrestre.

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE ?

Instruits de ces théories conflictuelles et acteurs passionnés de ces polémiques, les naturalistes voyageurs du début du XIX<sup>e</sup> siècle ne laissèrent plus échapper une seule occasion de les mettre à l'épreuve, en particulier sur la question des séismes. Charles Darwin, le découvreur de l'évolution des espèces, en fut un des premiers.

En 1831, il a à peine 22 ans lorsqu'il se lance dans une de ces extraordinaires aventures scientifiques qui ont défrayé les chroniques de ce siècle de découvertes. Il embarque en tant que savant naturaliste à bord de la frégate le *Beagle*, un trois-mâts affrété pour un tour du monde qui durera cinq ans. De ce voyage, il rentrera avec un mémoire extraordinairement précis des mondes qu'il aura croisés, si différents de ce qu'il connaissait en Europe – vies animales et végétales inconnues, phénomènes météorologiques extraordinaires, paysages géologiques grandioses, jusqu'à la description attentive des sociétés humaines des pays traversés. Il en tirera un livre étonnant et foisonnant d'observations, que l'on qualifierait aujourd'hui de « grand public ». Toujours réédité, *Voyage d'un naturaliste autour du monde* contient déjà ses idées révolutionnaires sur l'évolution des espèces. On y déniche d'autres passages au sujet des séismes : le *Beagle* reste plusieurs mois au Chili, un des pays les plus sismiques de notre planète. Darwin y ressent de nombreuses secousses, mais surtout, il est présent lors du violent séisme de Conception, en 1835 : « L'effet le plus remarquable de ce tremblement de terre fut l'élévation permanente de la Terre ; il serait probablement bien plus juste d'en parler comme de sa cause. On ne peut douter que les terres autour de la baie de Conception se soient soulevées de deux ou trois pieds. »

Inspiré par la lecture du premier tome des *Principes de Géologie* de Lyell, qu'il avait pris soin d'emporter sur le *Beagle*, et notant, près de la côte, la présence de coquillages marins à plus de 100 mètres d'altitude, il conclut ainsi, confortant

les thèses du savant écossais et de Hooke: « Il est difficile de douter que ces grandes élévations furent causées par de petits soulèvements successifs, tels celui qui accompagna ou causa le séisme de cette année, ainsi que par un soulèvement lent et insensible, qui est certainement en cours sur certaines parties de cette côte. »

Quant aux causes des séismes eux-mêmes, voici ce qu'il en disait: « Pour plusieurs raisons, je pense que les fréquentes secousses de la terre sur cette ligne de côte sont causées par le fendage des strates, conséquences nécessaires des tensions de la Terre lors de son soulèvement et de leur injection par des roches fluidifiées. »

Ainsi, pour Darwin, les grands séismes étaient la cause de la formation des montagnes, expérience vécue à l'appui: ce en quoi il avait vu juste, comme nous le détaillerons plus tard. Toutefois, sur l'origine de ce soulèvement et de ces tensions, il s'était un peu trop avancé, et l'avenir lui donna tort.

La présence d'un brillant naturaliste sur le lieu d'une grande catastrophe sismique résulta d'un heureux hasard, dont la probabilité était extrêmement faible à l'époque. Séismes et savants avaient d'autant moins de chance de se croiser que les premiers étaient plutôt rares en Europe, les seconds plutôt rares ailleurs. Pourtant, cette coïncidence se reproduisit moins de dix ans plus tard, avec un autre Charles...

Jeune géologue français en mission à l'île de la Dominique, dans les Antilles, Charles Sainte Claire Deville reçut son baptême sismique le 8 février 1843, lors d'une promenade champêtre. Très attentif, il observe: « D'abord assez faible, la secousse acquérait de moment en moment plus de violence; vers le milieu, elle est devenue extrêmement forte. Puis sans que le mouvement eut jamais cessé entièrement, il était réduit à n'être qu'à peine perceptible, lorsque les oscillations, reprenant

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

de nouveau, ont acquis plus de force que jamais, puis se sont enfin affaiblies par degrés.»

Deville note une durée de 105 secondes! En effet, son premier réflexe ne fut pas de se mettre à l'abri, mais de sortir sa montre pour noter l'heure, et de compter... Cela peut vous faire sourire, mais les récits de nombre de mes collègues – et ma propre expérience, je dois l'avouer – me confirment que, sur notre planète, les humains sismologues sont la seule forme de vie intelligente à se mettre à compter lorsque la terre tremble... mais est-ce bien intelligent?

Revenons à Deville. Il quitte rapidement la Dominique pour débarquer sur l'île de Guadeloupe, 30 milles plus au nord, où le désastre atteignit son paroxysme. À Pointe-à-Pitre, la perle des Antilles, 1 500 morts recensés, peut-être le double en comptant les esclaves; et dans un rayon de 50 kilomètres, tous les moulins de pierre qui servent à broyer la canne à sucre s'effondrent, ou sont mis hors d'usage (figure 5). L'économie de l'île est en ruine, tout comme celle de l'île d'Antigua, 30 milles au nord. Deville y enquête durant une année entière. Il observe une forte diminution des dommages avec la distance au «centre de la commotion». Dans un rapport publié quelque 20 ans après l'événement, inspiré par les théories nouvelles de la propagation des ondes dans les solides, il reprend ses notes et, en croisant les témoignages qu'il recueillit auprès des services maritimes des différents ports Caraïbes sur l'instant précis où fut ressentie cette commotion, il montre qu'elle était d'autant plus tardive que l'on se trouvait loin de la Guadeloupe, avec un retard de plus de 5 minutes à Cayenne, à 800 kilomètres de distance. Il en déduit une vitesse de cet «ébranlement» d'environ 2,5 kilomètres par seconde – ce qui est très proche de la valeur que l'on connaît actuellement, d'environ 3 kilomètres par seconde, pour la vitesse de ces ondes sismiques. Une vitesse

## PRÉ-VISIONS SISMIQUES



5. Destruction de Pointe-à-Pitre lors du séisme antillais de 1843.

extraordinaire, dix fois celle du son dans l'air, déjà bien connue à l'époque.

Quant à savoir ce qui s'était produit dans ce « centre de commotion », Deville resta sur sa faim, et nous aussi. Lors de ses nombreuses reconnaissances de terrain, il ne put observer que des effets induits par la violence de la secousse, mais non sa cause : glissements de terrain sur les pentes volcaniques instables de la Basse-Terre, couvertes de forêt tropicale ; effondrements de falaise sur les côtes atlantiques de la Grande-Terre et de Marie-Galante ; petits volcans de sable sur le littoral marécageux. Un témoignage retint toutefois son attention : le mémoire d'un certain docteur Duchassaing, déposé à l'Académie des Sciences en 1857. Il faisait état de mouvements verticaux notables en certains lieux des côtes de la Grande-Terre, d'après ses mesures du niveau marin par les coquillages nichés à la base des falaises côtières. Deville entrevit l'importance de ces observations pour

cerner la cause du séisme, et put consulter le dossier. Son intuition était juste : à la lumière des connaissances actuelles, ces observations devraient préciser des paramètres clés pour évaluer le risque de grands séismes dans cette région du monde. Hélas, le dossier n'est plus à l'Académie, et mes recherches pour le retrouver n'ont rien donné...

Le séisme de 1843 ne laissa aucune trace directe de son mécanisme. Notre géologue se perdit en conjectures compliquées sur la géométrie des grandes lignes de forces régionales liées aux surrections des montagnes : de la « géopoésie », dirait-on aujourd'hui à propos de ce genre de théorie mal fondée... Toutefois, si la source de la « commotion » lui restait mystérieuse, il fut l'un des premiers à en calculer la vitesse de propagation, confortant expérimentalement un concept mécanique encore théorique : celui d'« onde sismique ». Cette nette distinction entre le « centre de la commotion » et son extension à grande distance fut reprise une décennie plus tard par l'ingénieur anglais Robert Mallet, suite au grand séisme napolitain de 1857. Par ses observations détaillées des destructions, Mallet concluait que la source des vibrations était une zone de seulement quelques milles, bien petite en regard de toute la région commotionnée, et localisée à plusieurs kilomètres de profondeur. Mallet introduit ainsi la notion de foyer sismique.

Indépendamment, entre les années 1815 et 1830, les savants Charles-Louis Navier, Augustin Cauchy et Denis Poisson se penchent sur la question des ondes : mais au lieu de théoriser sur les tremblements mal connus des montagnes et des plaines, ils découvrent les lois des vibrations des solides simples à l'aide des mathématiques nouvelles et d'expériences de laboratoire. La cause première de ces ondes de vibration, démontrent-ils, vient d'une propriété découverte depuis près d'un siècle : l'élasticité des solides – et donc en particulier des roches.

## PRÉ-VISIONS SISMIQUES

Certes, les termes «élastique» et «roche» ne forment pas un ménage évident. Un petit saut hors de l’histoire va me permettre de vous éclairer sur ce drôle de couple qui aura des conséquences majeures sur la science des séismes.



## CHAPITRE 2

# Une Terre solide, élastique et cassante

Peut-on imaginer des caractères plus opposés que celui d'une gomme, que l'on peut arquer facilement entre le pouce et l'index, et celui d'un caillou ramassé sur le bord du chemin, qui paraîtra imperturbable à vos manipulations? De même, on n'a jamais vu un sol rocheux ou de béton s'enfoncer mollement sous chaque pas comme le tapis d'une salle de gymnastique... Visiblement, les pierres, le sol et les montagnes ne sont pas en caoutchouc.

Pourtant, ils sont tout comme, c'est-à-dire élastiques, car tout est question d'échelle. Par exemple, on sait maintenant calculer – et mesurer avec des appareils très sensibles – que, sous vos pieds, un sol de roche dure ou de béton s'enfonce de quelques microns (millièmes de millimètre) sous votre poids, jusqu'à une distance de quelques centimètres aux alentours (figure 6). Cela est évidemment peu: sur un trampoline, vous vous enfoncez 100 000 fois plus... La «pression» qu'exercent vos pieds sur le sol – et que le

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

sol exerce sur vous en retour – est de l'ordre de quelques dixièmes de bars. Un bar est la pression atmosphérique moyenne, égale à celle sous 10 mètres d'eau. C'est aussi, pour parler en unités internationales, 0,1 million de pascals.

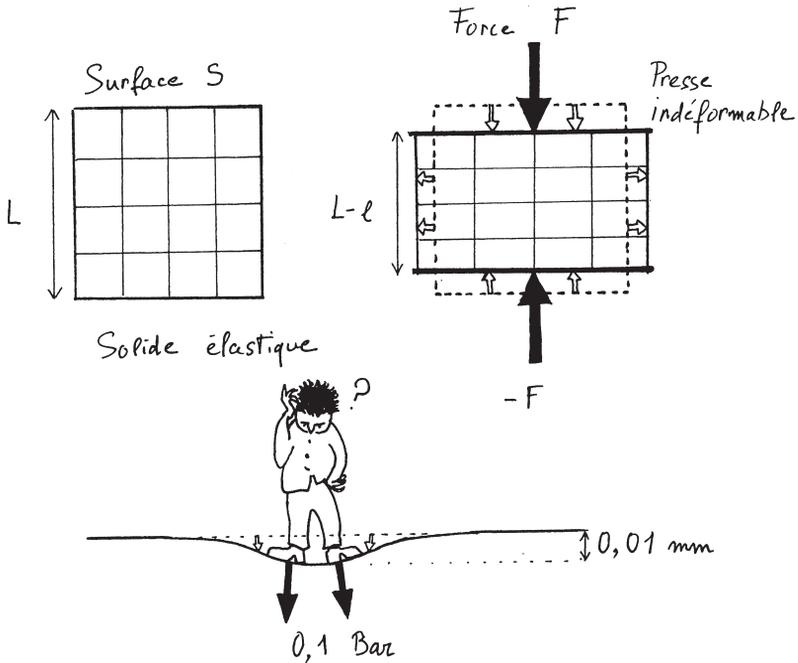
Si vous doublez votre poids après des excès de sucreries ou de body-building, la pression double: vous vous enfoncez donc deux fois plus, et paraissez plus petit – ce qui toutefois a peu de chances de vous faire changer d'habitudes, car la perte de taille est micrométrique. Si vous avez de grands pieds, vous vous enfoncez moins profondément; et, à l'inverse, les talons aiguilles vous font descendre, et donc rapetisser, contrairement aux idées reçues.

Dès que votre pied se soulève, la surface du sol reprend sa forme première. C'est cela, l'élasticité: soumis à des pressions – on dit aussi «contraintes» lorsque ces pressions ont une composante oblique à la surface – les solides élastiques se déforment en proportion de ces actions, puis reprennent leur forme initiale lorsque la contrainte s'annule. La différence mécanique entre la gomme et la pierre est donc surtout une histoire de quantité, et non de qualité: toutes deux sont élastiques, mais l'une est dix mille, voire cent mille fois moins élastique que l'autre...

Autant cette déformation élastique des roches est imperceptible à l'œil, autant les limites de son élasticité sautent aux yeux et font partie de l'expérience commune: un violent coup de masse sur une pierre peut la briser, mais ne laisse pas le temps de la voir se comprimer de quelques dixièmes de millimètre, tout comme la masse elle-même, juste avant sa rupture. Cela met en évidence la deuxième caractéristique des roches à la surface de notre planète: elles cassent quand on tape dessus suffisamment fort.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire de donner un coup violent: les roches se brisent aussi lorsqu'on les comprime lentement, par exemple en les insérant dans de grandes presses très résistantes,

## UNE TERRE SOLIDE, ÉLASTIQUE ET CASSANTE



6. Déformation élastique des roches et du sol. Les forces sont représentées par des flèches noires épaisses, les déplacements par des flèches blanches épaisses.

sorte de gros casse-noix. Les roches se déforment de plus en plus, jusqu'à ce qu'en leur sein des microfissures apparaissent, grandissent, fusionnent pour provoquer des fractures majeures et faire éclater le bloc. Qu'elle soit très rapide, par un choc, ou très lente, une augmentation de la pression mécanique sur les roches au-dessus d'un certain seuil les fait se fracturer et se rompre. Quel est ce seuil? Pour les roches communes trouvées à la surface du globe, il est de quelques centaines à quelques milliers de fois la pression qui existe sous votre pied lorsque vous êtes debout – soit des centaines de fois la pression atmosphérique. Autrement dit, si des centaines d'acrobates se hissaient sur vos épaules en une vertigineuse figure, le sol se fracturerait sous vos pieds... En fait,

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

vos os auraient éclaté avant, car bien que solides, ils sont plus fragiles que les pierres! Ces pressions, menaçantes à l'échelle de notre corps, n'ont rien d'extraordinaire à l'échelle de la Nature: 100 bars est aussi la pression exercée sous mille mètres d'eau, ou encore la pression exercée sous 300 mètres de roche, ces dernières étant trois fois plus denses que l'eau. Les roches ne sont donc pas infiniment élastiques. Elles ont une limite de rupture, et sont « fragiles » comme le verre.

Alors, me direz-vous, les roches de notre planète doivent être totalement broyées par le poids des roches ou de l'eau qui les recouvre, car la plupart sont à des profondeurs bien supérieures à quelques centaines de mètres! En fait, non, car les presses, tout comme le casse-noix, exercent des forces dirigées dans un seul axe: la roche se comprime dans cette direction, et se dilate, par compensation, dans l'autre. On peut observer cet effet sur une balle de caoutchouc que l'on écrase et qui enfle latéralement. Dans un bloc de roche, contrairement à la balle, cette déformation latérale ouvre de nombreuses microfissures. Celles-ci facilitent la dilatation, mais en grandissant et en se rejoignant, elles participent à la dégradation du solide. Si une pression latérale tout aussi forte empêche la roche de se dilater, comme cela se produit à grande profondeur, les fissures ne se créent pas, et la roche ne se fracture pas, même à de très fortes pressions.

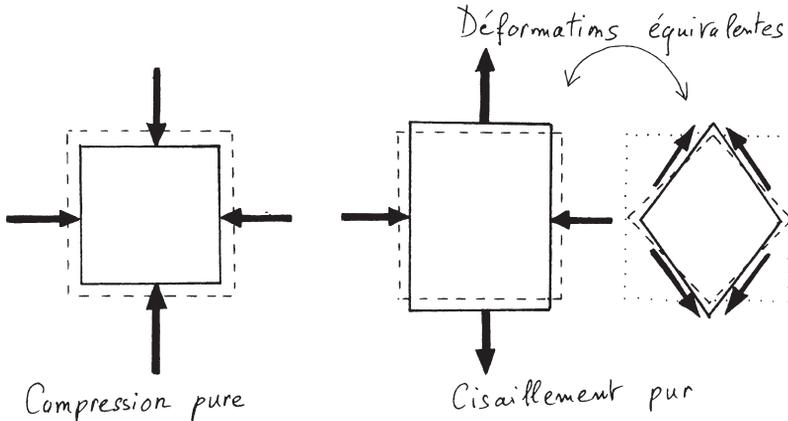
En bref, ce n'est pas tant la valeur de la pression maximale appliquée qui fait qu'une roche éclate ou pas, mais la différence de pression dans des directions perpendiculaires – souvent verticale et horizontale. À grande profondeur, les roches sont protégées de l'éclatement par la présence des roches alentour, à la même pression, qui les maintiennent comprimées.

*Des ondes dans les solides*

Oublions pour un temps cette fragilité des roches – vous vous doutez qu'elle n'est pas pour rien dans la génération des séismes – pour nous attarder sur leur caractère élastique. Revenons à notre matériau élastique préféré, la gomme. Comprimez-la dans votre poing : elle rapetisse, s'élargit dans l'autre direction, et son volume diminue. Tirez ses deux extrémités : elle s'allonge et s'affine. Mais vous pouvez aussi la « cisailer », c'est-à-dire faire subir à ses extrémités des mouvements latéraux opposés, sans changer de volume. Le rectangle se déforme et devient une sorte de losange (figure 7). Ces deux modes de déformation, compression-extension d'une part, et cisaillement d'autre part, sont les deux modes fondamentaux de déformation des solides – et donc des roches. Cette double capacité de déformation est à l'origine des vibrations, car qui dit élastique dit capacité à vibrer.

Prenez un de ces grands ressorts, disponibles dans les boutiques de gadgets, que les gamins s'amuse à faire descendre les escaliers, marche à marche... Laissez-le pendre d'une main, tirez sur l'extrémité basse avec l'autre et lâchez-le tout d'un coup : il oscille, vibre, d'autant plus lentement que le ressort est long. Plus précisément, il alterne des compressions (ressort raccourci) et des dilatations (ressort allongé). Prenez maintenant une baguette de bois, de plastique ou de métal, et fixez son extrémité sur un socle bien stable. Ployez l'extrémité libre, et lâchez : la baguette oscille, vibre, d'autant plus lentement que la baguette est longue. La baguette ne s'allonge ni ne raccourcit, mais alterne des cisaillements dans un sens et dans l'autre. Le caractère élastique du ressort ou de la baguette est la cause de l'oscillation : initialement déformé, le solide cherche à reprendre sa forme initiale, mais y parvient trop brutalement et est entraîné par sa vitesse et sa masse – par « inertie »,

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

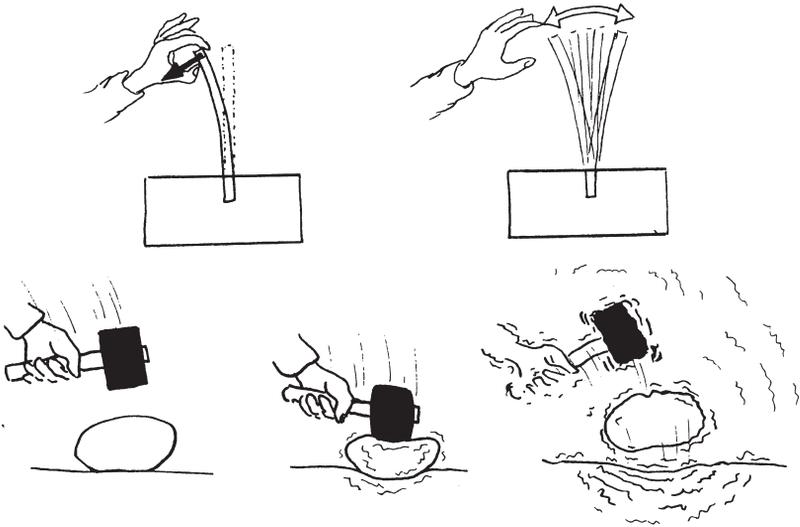


7. Les deux modes de déformation des solides : compression/dilatation, et cisaillement. Pour un même cisaillement, suivant l'orientation de la surface plane sur laquelle on mesure la force, cette dernière peut être perpendiculaire (au centre) ou parallèle (à droite) à cette surface.

dit-on – dans une position déséquilibrée opposée, où il finit par s'arrêter, hors d'équilibre... pour revenir à la position centrale, mais toujours trop vite, et ainsi de suite jusqu'à ce que les frottements et pertes d'énergie diminuent ses oscillations et qu'il se fige (figure 8).

Le bruit d'un caillou qui en frappe un autre est la marque de cette vibration du solide, qui se transmet à l'air alentour jusqu'à notre oreille. Plus le caillou est gros, ou « mou », plus le son est grave. « Poc » est le cri d'un caillou mou ou gros que l'on frappe, et « pic » est celui d'un caillou petit ou rigide... Dans un registre plus musical, les cloches, diapasons, peaux de tambour, gongs, touches de xylophone, guimbardes, verres qui tintent, mais aussi craies crissant sur un tableau noir, à vrai dire tout ce qui peut vibrer et faire du bruit – et, pour ce qui concerne ce livre, terre qui gronde – a des sonorités issues du même principe d'élasticité.

## UNE TERRE SOLIDE, ÉLASTIQUE ET CASSANTE



### 8. Déformation et vibration d'objets solides et élastiques.

Les roches peuvent donc vibrer, mais dans des proportions infimes et invisibles. Plus l'objet est gros, plus il vibre lentement : un caillou vibre à une fréquence audible – « pic » ou « poc » –, à quelques milliers de hertz (nombre d'oscillations par seconde), alors que la planète Terre, quand un astéroïde ou un grand séisme l'ébranle, vibre comme une cloche aux fréquences très basses, correspondant à des périodes de plusieurs dizaines de minutes. Autant dire qu'on ne l'entend pas vibrer ; on peut toutefois mesurer cette vibration.

Cette capacité des solides à se déformer élastiquement ne se limite pas à la production de sons. Que se passe-t-il quand seul un petit élément du solide est tout à coup soumis à une force ? Il va se déformer instantanément en prenant appui sur les éléments voisins, qui vont donc à leur tour se déformer, et ainsi de suite, de proche en proche. Moins le solide est dense, ou bien plus il est rigide, plus cette transmission de la

## POURQUOI LA TERRE TREMBLE?

déformation est rapide. C'est une onde élastique. Il en est ainsi des séismes : des forces internes, dont je reparlerai plus loin, créent une déformation soudaine dans un endroit souterrain de la planète, et une onde sismique – cet « ébranlement » dont parle Deville – rayonne dans toutes les directions à partir de ce centre, baptisé foyer sismique.

Une image commune pour représenter ces ondes est celle des ronds dans l'eau produits par un caillou jeté dans un bassin : du point d'impact partent des vaguelettes circulaires concentriques qui s'éloignent du centre à vitesse régulière, balayant progressivement la surface du bassin. Il s'agit bien d'une onde, car le mouvement est transmis de proche en proche. La différence avec les ondes sismiques est que la force de rappel agissant sur l'eau est liée non pas à son élasticité, mais à la force de gravité : dans le champ de pesanteur terrestre, une bosse à la surface de l'eau a tendance à redescendre pour retrouver son équilibre et inversement pour un creux, ce qui explique l'apparition d'ondes lorsque la surface est perturbée.

Pour visualiser de véritables ondes sismiques, vous devez revenir au solide élastique et passer du milieu réel à trois dimensions, à un milieu à une dimension. Première expérience : vous attachez l'extrémité d'une longue corde – 10 mètres ou plus –, vous la tenez à la main par l'autre extrémité, vous la tendez, et la secouez prestement, comme un fouet : la corde se tord, et cette déformation se propage à l'autre bout où elle se réfléchit en revenant vers votre main. C'est une onde. Il est clair que c'est l'onde – ou le mouvement – qui se propage, et non pas la corde... Cette dernière bouge perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Les ondes de cisaillement dans les roches ont exactement ce type de mouvement.

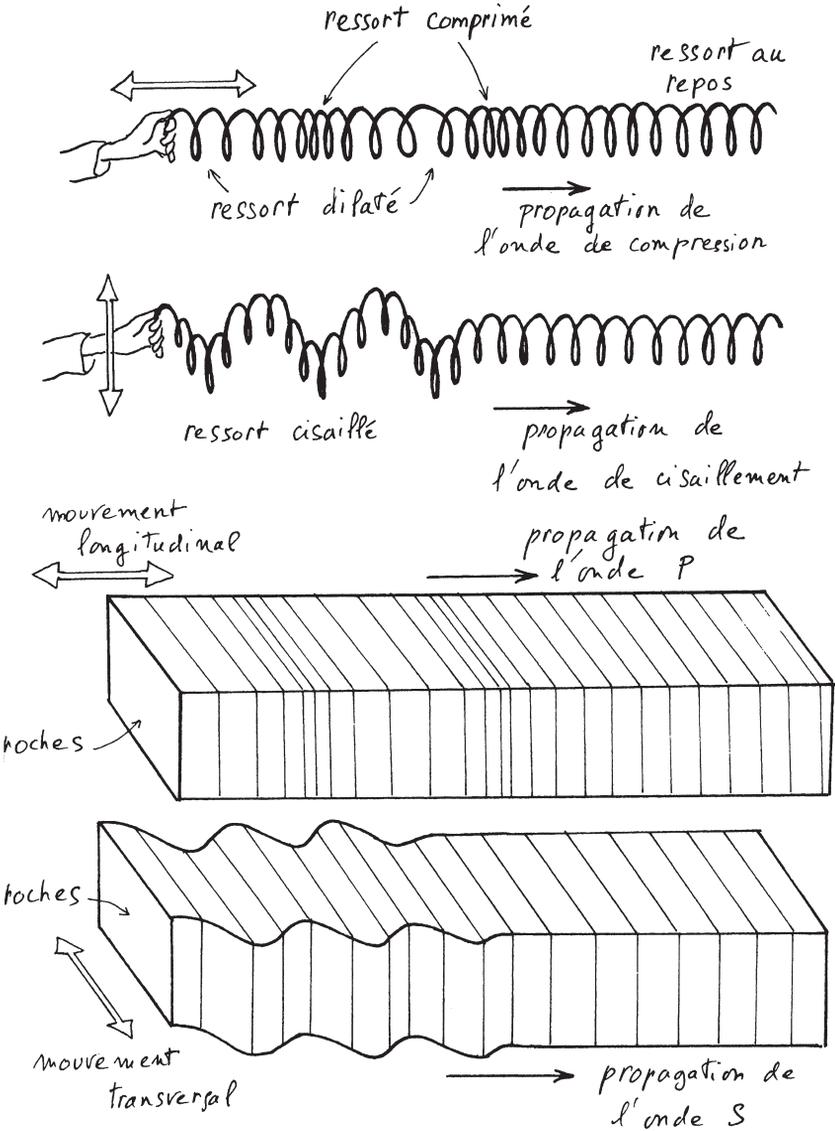
Deuxième expérience : vous achetez deux ou trois ressorts cascadeurs ; vous les scotchez les uns aux autres, vous tendez

ce grand ressort sur une surface lisse pour réduire les frottements ; enfin, vous en secouez une extrémité, comme avec la corde, perpendiculairement à sa direction. Là, pas de surprise, vous voyez des ondes similaires à celles de la corde, avec des ondulations transverses à la propagation. Maintenant, vous agitez le ressort dans sa direction d'allongement : le ressort ne se tord plus, mais se comprime et se dilate au passage d'une nouvelle forme de vibration : ce sont des ondes de compression semblable à celles qui se produisent dans les roches (figure 9).

Ces expériences sont visuelles, car elles mettent en jeu des vitesses de propagation lentes, de quelques mètres par seconde, et de grandes déformations. Les roches, plus rigides, portent des ondes sismiques mille fois plus rapides et des déformations bien plus petites. Ainsi, à la surface de notre planète, à raison de trois kilomètres par seconde, une onde sismique court les 100 mètres en trois centièmes de seconde, traverse Paris en quatre secondes, la France en quatre minutes, et fait le tour de la Terre en quatre heures... En fait, les roches ne toléreraient pas la déformation imposée au ressort : elles cassent pour des déformations de 0,1 %, alors que notre petit jeu distord le ressort sans l'endommager, le faisant jouer de 10 cm sur une longueur d'un mètre, soit une déformation de 10 %.

Un « choc sismique », comme disait Deville, génère donc des vibrations dans toutes les directions – nous verrons plus tard comment – et les premières ondes qui atteindront un point éloigné à la surface de la Terre seront des ondes de compression – dites ondes « P », pour « premières » : quinze minutes pour venir de Grèce en France ; une heure pour venir d'Inde ; une heure trente pour venir du Japon, de Californie ou du Chili. Les ondes de cisaillement sont près de deux fois plus lentes : elles sont baptisées ondes « S », pour « secondes ».

POURQUOI LA TERRE TREMBLE?



9. Génération d'ondes dans les solides. De haut en bas : une onde de compression dans un ressort ; une onde de cisaillement dans un ressort ; une onde de compression (« P ») dans une roche ; une onde de cisaillement (« S ») dans une roche.

*Premières mesures sismiques*

Ces mesures des ondes sismiques, même à de grandes distances, même pour des mouvements du sol aussi petits que des fractions de micron (un millionième de mètre), sont devenues banales ; mais comment diable fait-on ? Une image de haute technologie vous vient sans doute à l'esprit : un ressort portant une lourde masse et un stylo, du papier en rouleau qui se déroule, une horloge chronomètre, et voilà un sismographe ! Sismographe flambant neuf du début du xx<sup>e</sup> siècle, aujourd'hui pièce de musée, cette image d'Épinal se porte bien. En réalité, il existe toutes sortes d'appareils à mesurer les séismes.

Le plus ancien sismomètre conservé de nos jours fut conçu par un maître chinois, Zhang Heng, en l'an 132 de notre ère. L'Empereur souhaitait être informé des grands séismes de Chine dès la catastrophe, sans avoir à attendre la venue de messagers qui arrivaient des provinces reculées des jours plus tard. L'appareil était constitué d'une grande jarre à vin, percée dans sa partie haute de huit orifices ornés de dragons, chacun à l'aplomb d'un crapaud de bronze placé au sol. À l'intérieur, une lourde masse était suspendue. Lors d'un séisme, le balancement de cette masse libérait une bille qui sortait par l'un des trous, et tombait dans la gueule grande ouverte d'un des crapauds. Cette « girouette à tremblements de terre » indiquait donc non seulement le passage d'une onde sismique, mais aussi la direction de l'oscillation, signalé par le crapaud à la bille... J'ignore si l'Empereur en a tiré quelque gloire, et ses sujets quelque secours, mais l'idée était astucieuse, et l'appareil – un cylindre de 2 mètres de diamètre – fut fabriqué pendant de nombreux siècles.

Entre 1750 et 1850, avec l'intérêt grandissant des savants pour les séismes, toutes sortes d'appareils de mesure furent

construits. Chaque inventeur avait son idée: des coupelles pleines de mercure, dont on analysait le volume et la disposition des éclaboussures; des pendules laissant leur trace sur de la cendre, du sable fin ou du papier. Les plus élaborés incluaient une horloge, censée s'arrêter lors de la secousse par quelque astucieux mécanisme. Il va sans dire que ces instruments rudimentaires ne servaient que d'indicateurs de séismes, ne gardant aucune trace du déroulement temporel du mouvement.

Pour lever le voile sur le détail des ondes sismiques et de leur source, il était nécessaire d'enregistrer le temps: en somme, il fallait concevoir des sismomètres dignes de ce nom. Notez que l'on ne dit plus guère «sismographe», terme réservé aux instruments traçant directement le signal sur papier, sans autre mémorisation. Les ordinateurs et leur mémoire numérique les ont rendus obsolètes, et le terme «sismomètre» est devenu générique. À l'heure de la secousse de 1843, Sainte-Claire Deville et sa montre à gousset ont sans doute constitué le premier sismomètre!

Nous voici revenus au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle: à cette époque, les théories de l'élasticité des roches se développent rapidement. Les ondes longitudinales et transversales observées en 1828 par Denis Poisson sont décrites mathématiquement vers 1850, par George Stokes et Gabriel Lamé, comme des ondes de compression/dilatation et des ondes de cisaillement, plus lentes. En 1851, Mallet réalise la première expérimentation à l'aide de tirs de dynamite et de sismographes spécialement conçus pour l'expérience, initiant une nouvelle branche de la sismologie qui parvint, en quelques décennies, à préciser les vitesses sismiques des premiers kilomètres de la croûte terrestre.

Les développements théoriques se poursuivent: on démontre que dans un milieu solide hétérogène comme la Terre, avec ses couches de roches où les vitesses varient, les ondes se propagent

## TABLE DES MATIÈRES

Prologue	5
<b>Partie I. Tempêtes souterraines</b>	9
Chapitre 1. Pré-visions sismiques	11
Chapitre 2. Une Terre solide, élastique et cassante	35
Chapitre 3. Failles et dislocations	53
<b>Partie II. Le cycle chaotique des séismes</b>	87
Chapitre 4. La hiérarchie sismique	89
Chapitre 5. L'œuf et la poule	113
<b>Partie III. Le décryptage d'une secousse</b>	135
Chapitre 6. Regards croisés	137
Chapitre 7. Premières images de l'invisible	161
<b>Partie IV. La chasse aux précurseurs</b>	187
Chapitre 8. Coups de semonce	189
Chapitre 9. Fuites en tout genre	221
Chapitre 10. Aléas de la prédiction	255
<b>Partie V. Bruits et tremblements</b>	265
Chapitre 11. Instabilités menaçantes	267
Chapitre 12. Bruits exotiques	309
<b>Partie VI. Pourquoi prédire?</b>	347
Chapitre 13. Alerte au séisme!	349
Chapitre 14. Bien construire	377
Chapitre 15. Enquêtes sur un passé sismique	391
Chapitre 16. La menace se précise	421
Épilogue	443
Glossaire	453
Bibliographie	459

## Crédits

Couverture : [iStockphoto.com/George Peters](https://www.istockphoto.com/George-Peters)

p. 13: Pascal Bernard • p. 19: Bnf, Paris • p. 25: [iStock/Thomas Faull](https://www.istockphoto.com/Thomas-Faull) • p. 26: François Michel • p. 31: *Illustrierte Zeitung*, juillet 1843 • p. 49: *Nature*, 25 juillet 1889 • p. 52: Coll. part. • p. 54: J. Milne and W. K. Burton, *The Great Earthquake in Japan, Yokohama, 1892* • p. 65: Antonio Snider Pellegrini, *La Création et ses mystères dévoilés, 1859* • p. 79: *Academia Sinica* • p. 85: F. H. Cornet, *EOST* • p. 94: Coll. part. • p. 149: Interférogramme Satellite Radar, courtoisie de P. Elias, produit à partir de scènes SAR ERS, ESA • p. 163: courtesy of Aykut Barka, Istanbul Technical University • p. 213: Courtesy of Vladimir G. Kossobokov, IEPT, RAS (Institute for Earthquake Prediction Theory, Russian Academy of Science • p. 385: Sipa/AP • p. 393: AHEAD • p. 398h: AHEAD • p. 398b: BCSF • p. 399h: AHEAD • p. 399b: BCSF • p. 405: Geoter, Irsn, 1992 • p. 410: IPGP/DR, avec l'aimable autorisation de Nathalie Feuillet • p. 437: BCSF. Avec l'aimable autorisation de Ch. Sira. •

Iconographie : Any-Claude Medioni