

# MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI SISMICI IN UNA VALLE ALPINA

In tempi recenti, il terremoto del Cile, quello di Haiti e l'evento aquilano del 6 aprile 2009, hanno catalizzato l'attenzione dell'opinione pubblica. Nonostante la sismologia e l'ingegneria sismica siano discipline mature, è ancora oggi estremamente difficile prevedere quale potrebbe essere l'effetto di un sisma laddove tali eventi siano molto rari e/o caratterizzati da particolari condizioni geologiche e morfologiche. I moderni metodi numerici di calcolo possono aiutarci a simulare questi scenari generando dei terremoti simili a quello dell'Aquila ma localizzati lungo altre faglie considerate attive.

## 1. INTRODUZIONE

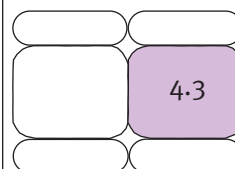
Lo sviluppo della civiltà umana ha da sempre dovuto fronteggiare diversi tipi di catastrofi naturali, tra le quali i terremoti. Tuttavia, solo all'inizio del XX secolo è stata proposta una teoria, nota come "tettonica delle placche" o "tettonica a zolle", in grado di fornire un'interpretazione fisica dell'origine dei terremoti. Semplificando notevolmente, essa può essere riassunta nel seguente modo: la litosfera terrestre, ovvero la parte più superficiale del nostro pianeta, risulta essere suddivisa in blocchi di dimensioni più o meno grandi (ordine di grandezza di un continente o sue porzioni) ed essi sono in continuo movimento a causa del materiale sottostante. Le velocità che caratterizza tale movimento è oggi nota grazie alle misurazioni attraverso il sistema GPS e risulta dell'ordine dei mm/anno. Ogni blocco, nel corso dei millenni, scivola addosso ad un altro e questa lentissima ma continua collisione genera un accumulo di energia in punti precisi, ad esempio lungo i bordi delle "placche". L'impossibilità di sostenere un certo livello di sforzo, innesca un terremoto, il quale dunque

non rappresenta altro che il rapido (alcune decine di secondi) rilascio dell'energia accumulata nel corso di centinaia o migliaia di anni; tutto questo con le conseguenze catastrofiche che ben conosciamo.

La nascita della moderna sismologia, basata su strumenti capaci di misurare lo scuotimento del terreno e l'affinarsi di diverse competenze scientifiche, hanno permesso di produrre delle mappe del rischio sismico ragionevolmente attendibili. Oggi siamo dunque in grado di sapere quale scuotimento massimo dobbiamo attendere in una particolare regione del pianeta e dopo quanto tempo in media un analogo evento si verificherà nuovamente. D'altra parte questo tipo di informazione è disponibile con attendibilità diversa a seconda della regione oggetto di indagine. Per fare un esempio concreto, il territorio italiano è colpito circa una volta ogni 10-20 anni da sismi di media magnitudo (Friuli 1976 Mw6.4, Irpinia 1980 Mw6.9, Umbria-Marche 1996 Mw6.0, Aquila 2009 Mw6.3). La magnitudo momento (Mw) è una misura quantitativa dell'energia rilasciata durante un evento sismico; una Mw pari a 5, è paragonabile all'energia rilascia-



Marco Stupazzini



ta dalla bomba atomica di Hiroshima, i sismi di Haiti (12/01/2010) e del Cile (27/02/2010) avevano una magnitudo rispettivamente pari a 7.0 e 8.8. Bisogna tenere presente che tale scala è logaritmica: all'incremento di un punto corrisponde un sisma 32 volte più intenso (il sisma del Cile è stato circa 1000 volte più forte di quello di Haiti). Le informazioni sugli effetti che questi eventi hanno prodotto sul costruito (scala macrosismica) sono opportunamente tabulati; per esempio in Italia il catalogo parte dal 79 d.C. e arriva fino ai nostri giorni [1], ovviamente con accuratezza e completezza diversa a seconda del periodo storico. Questi "cataloghi dei terremoti" sono il frutto del lavoro congiunto di équipes multidisciplinari formate da storici, geologi, geofisici e ingegneri sismici.

Non sempre però le informazioni storiche sono sufficienti: nella regione di Grenoble (Alpi Francesi), non si ha memoria scritta di terremoti catastrofici e questo potrebbe erroneamente portare a considerare la regione esente da rischio sismico. In nostro aiuto vengono i geologi strutturali e sismotettonici, i quali, attraverso un lavoro investigativo degno dei migliori detective, hanno ricostruito la storia geologica dell'area e hanno tracciato la posizione delle faglie attive, cioè delle "rotture" all'interno della crosta dove viene accumulata e successivamente rilasciata l'energia sotto forma di scuotimento.

Il nuovo interrogativo al quale si deve rispondere è come produrre una mappa dello scuotimento atteso per una zona di cui si conosce la posizione delle faglie anche se non è mai stato osservato fino ad ora un evento di intensità tale da produrre danni ( $M_w > 5.5$ ) in quella regione.

Attorno alla seconda metà degli anni '60 due brillanti studiosi A. Cornell e L. Esteva gettarono le basi per uno studio probabilistico del rischio sismico [2] che venne successivamente formalizzato da Cornell in una famosa pubblicazione [3]. L'approccio probabilistico, in inglese *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA), è estremamente popolare oggi ed è stato usato in modo soddisfacente a scala mondiale. Ad ogni sorgente viene associata una certa probabilità di generare un terremoto e attraverso opportune relazioni, funzioni della  $M_w$ , della distanza tra sorgente e sito di interesse e delle condizioni geologiche locali, è possibile calcolare lo scuotimento atteso per

una determinata posizione e un certo tempo di ritorno (intervallo medio di tempo tra due eventi sismici). Bisogna tenere presente che queste funzioni sono di solito calibrate con dati provenienti da sismi avvenuti in diverse zone del pianeta e, sebbene in tempi recenti vi sia stato un notevole sforzo per migliorarne la qualità (si veda il progetto "NGA" [4]), esse possono risultare piuttosto imprecise a causa di una serie di ineludibili incertezze epistemiche<sup>1</sup> o meno.

Da sottolineare che, proprio per quanto riguarda l'approccio probabilistico, è stata recentemente promossa un'iniziativa a livello mondiale [5] con l'obiettivo di raccogliere tutte le informazioni necessarie per definire i modelli attraverso i quali saranno successivamente prodotte le mappe di scuotimento per i diversi Paesi. Il metodo probabilistico, sebbene abbia offerto un'ottima risposta al problema concreto di definire il rischio sismico, non è tuttavia esente da limiti: questi si incontrano per esempio qualora sia importante studiare nel dettaglio la fisica del processo di propagazione delle onde e la loro interazione con strutture geologiche complesse, come nel caso delle valli alpine o appenniniche.

In effetti, la propagazione delle onde sismiche che vengono originate dalla sorgente (la faglia) è guidata da precise leggi fisiche ben note sin dal XVIII secolo. La soluzione di queste equazioni può risultare in alcuni casi molto difficile in "forma chiusa", cioè attraverso una semplice funzione, per esempio quando la geometria del problema è complessa. Solo l'avvento del calcolatore ha reso possibile lo studio del terremoto secondo il processo fisico da cui è governato. Abbandoniamo per un momento la sismica e immaginiamo una situazione decisamente più familiare: un bambino che getta un sasso in uno stagno e fa incresparsi l'acqua. I fronti d'onda, all'inizio circolari, si propagano nello stagno ma se il fronte incontra un ostacolo (quale un isolotto o un cigno) esso si incurva e genera ulteriori riflessioni. Il sisma nell'analogia è il sasso, l'acqua è il terreno e l'ostacolo è una delle complesse strutture geologiche che si possono incontra-

<sup>1</sup> Per "incertezza epistémica" si intende una mancanza di conoscenza strettamente legata al fenomeno fisico studiato.

re decine o centinaia di metri sotto la superficie terrestre.

Nei prossimi paragrafi descriveremo brevemente i metodi numerici che vengono impiegati per questo tipo di studi, presenteremo alcuni risultati dell'analisi di risposta sismica condotta per la valle alpina di Grenoble, e infine trarremo alcune conclusioni sul futuro della moderna sismologia numerica.

## 2. IL METODO AD ELEMENTI SPETTRALI PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DI ONDE SISMICHE

Durante e soprattutto dopo la seconda guerra mondiale, i calcolatori si sono sempre maggiormente diffusi ed evoluti, fino ad arrivare ai giorni nostri, in cui il "personal computer" è ormai omni presente.

Congiuntamente, il calcolo numerico, disciplina che rientra nella classe della matematica applicata, ha subito un notevole sviluppo nel progettare metodi per la risoluzione "pratica" di problemi matematici tramite opportuni algoritmi. Si noti che la soluzione calcolata da un algoritmo (cioè la soluzione numerica) è sempre un'approssimazione di quella esatta. Da questo si evince facilmente che la bontà di un metodo numerico può essere valutata attraverso due fattori:

**i.** l'accuratezza della soluzione, ovvero la differenza tra la soluzione esatta e quella numerica,  
**ii.** la velocità con cui la soluzione viene ottenuta. Spesso è necessario un compromesso poiché una soluzione molto accurata può richiedere tempi di calcolo inaccettabili e viceversa una soluzione numerica ottenuta in tempi rapidi può discostarsi troppo dalla realtà e non essere utile. Una serie di fenomeni fisici possono oggi essere studiati attraverso dei metodi numerici opportunamente implementati al calcolatore (per esempio il calcolo statico per la progettazione di un edificio, le sollecitazioni a cui è soggetto un aeroplano durante il volo, la simulazione di eventi di piena ecc.).

Tornando dunque al tema della nostra discussione, il terremoto può essere visto come un caso particolare della ben più generale propagazione di onde in un mezzo elastico (onde elastodinamiche per l'appunto). I metodi numerici che consentono lo studio di questo tipo di problema fisico sono molteplici e ci limiteremo a ci-

tare il metodo ad elementi spettrali (*Spectral Element Method*, SEM [6, 7, 8]), sviluppato a partire dalla prima metà dagli anni '90 del secolo scorso, poiché tutte le simulazioni che verranno presentate in seguito sono state ottenute attraverso il codice di calcolo GeoELSE [9, 10] che implementa questo particolare metodo numerico. Senza scendere nei dettagli, è importante sottolineare che i SEM possono essere visti come un'evoluzione del ben più noto e diffuso metodo agli elementi finiti (*Finite Element Method*, FEM, [11]). I SEM risultano particolarmente adatti per lo studio di problemi dinamici e, in tale ambito, garantiscono una soluzione molto accurata in tempi di calcolo accettabili.

## 3. LA VALLE DI GRENOBLE: DALLA REALTÀ AL MODELLO NUMERICO

Le valli alpine sono il risultato dell'incessante lavoro di modellazione compiuto prima dai ghiacciai e poi, una volta ritirati o scomparsi, dai corsi d'acqua che ne hanno preso il posto. Il risultato sono delle valli che, semplificando, presentano una caratteristica sezione trasversale a forma di "V", nelle quali la punta risulta essere riempita di materiali decisamente più soffici (detrimento di morena, ghiaie e sabbie compatte) rispetto a quello delle montagne circostanti (prevalentemente marmi, graniti o calcari); vista la configurazione geometrica la "V" viene chiamata "letto roccioso", perché proprio come un letto raccoglie i materiali più soffici depositati in epoche successive. La conoscenza della geometria dell'interfaccia tra materiali soffici e rigidi è una delle condizioni necessarie per poter analizzare la risposta sismica della valle. Si noti che questo tipo di studio richiede un notevole impegno sia finanziario che temporale, visto che questa interfaccia è sepolta a diverse centinaia di metri di profondità e per delimitarla è necessario compiere uno studio di sismica a riflessione o rifrazione lungo diversi allineamenti. Possiamo chiarire il concetto facendo un'analogia con quello che accade quando una persona si sottopone ad una TAC (Tomografia Assiale Computerizzata) in ospedale: durante l'esame il medico riesce ad ottenere un'immagine di quello che è presente all'interno del paziente in modo "non invasivo" cioè senza effettuare incisioni, grazie alla propagazione

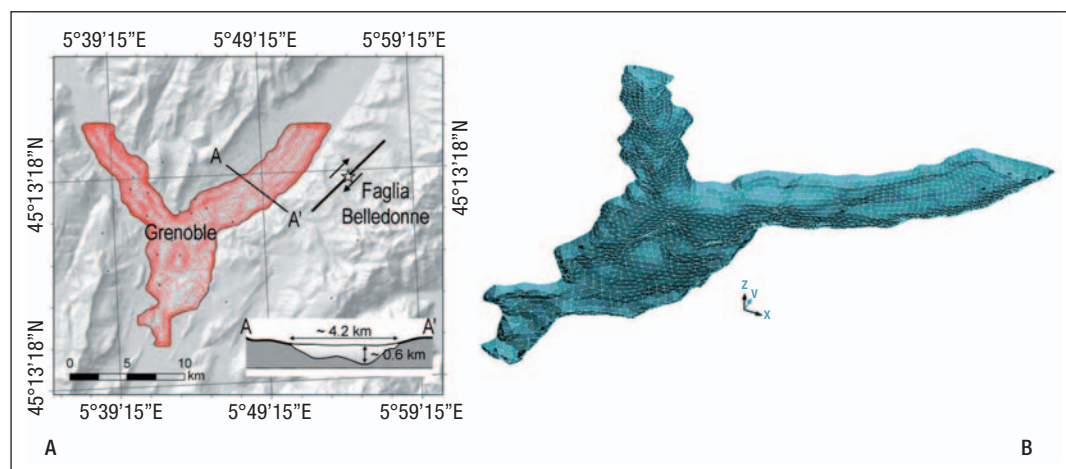
e attenuazione di particolari onde che attraversano i diversi tessuti di cui il corpo umano è composto e raggiungono nuovamente la superficie, cioè la pelle.

Si tenga presente che la tomografia sismica ricopre oggi un ruolo fondamentale in diversi settori, per citarne uno su tutti, l'industria petrolifera che riesce ad individuare la presenza di giacimenti anche grazie a questa tecnica; inoltre, la comunità europea ha finanziato un progetto di ricerca incentrato proprio su queste tematiche [12].

Lo studio della risposta sismica della valle alpina di Grenoble si presenta come un problema particolarmente interessante, vista la precisione con cui è nota la forma tridimensionale del contatto tra materiali soffici e letto roccioso. Una ricostruzione così dettagliata è stata pos-

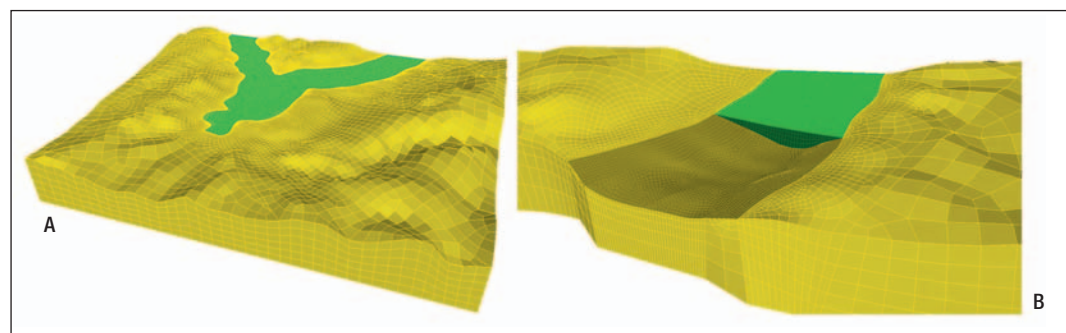
sibile grazie ai dati raccolti nel corso degli anni dal *Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique* (LGIT) di Grenoble [13]. Nella figura 1 viene mostrata la zona di Grenoble e la forma tridimensionale del bacino alluvionale (contatto letto roccioso - materiali soffici).

Una volta acquisiti i dati che descrivono la geometria reale, tipicamente attraverso *Computer Aided Design* (CAD) o *Geographic Information System* (GIS), essi devono essere tradotti in un modello numerico (la griglia di calcolo) che il calcolatore sia poi in grado di leggere e interpretare. L'operazione può essere piuttosto complessa e sono stati creati appositi programmi per aiutare l'utente in questa delicata fase: il programma CUBIT [14] riesce a gestire la creazione di griglie di calcolo molto sofisticate. La figura 2 mostra quella realizza-



**FIGURA 1**

A - Il bacino alluvionale di Grenoble, la posizione della faglia Belledonne e le isobate del contatto letto roccioso – materiali soffici (linee in rosso). In basso è riportato lungo la sezione AA' l'andamento di un profilo bidimensionale. B - La complessa forma dell'interfaccia letto roccioso-materiale soffice in una sua ricostruzione tridimensionale



**FIGURA 2**

A - La griglia di calcolo realizzata per lo studio di risposta sismica della valle alpina di Grenoble (Alpi francesi). B - Dettaglio della griglia di calcolo nella zona di contatto tra il letto roccioso (giallo scuro) e il deposito alluvionale (colore verde)

ta per la valle di Grenoble. I materiali rigidi (colore giallo) sono discretizzati da elementi più grandi rispetto a quelli del deposito alluvionale (colore verde), questo si rende necessario per riuscire a campionare correttamente l'onda sismica durante il suo percorso. L'ottimizzare questa transizione attraverso griglie di calcolo non strutturate, passando cioè da una griglia fine ad una lasca senza sprecare troppi elementi, è uno dei punti cruciali per ottenere soluzioni numeriche accurate in tempi di calcolo ragionevoli.

#### 4. LA RISPOSTA SISMICA DELLA VALLE DI GRENOBLE

Una volta raccolti tutti gli "ingredienti" necessari per la nostra simulazione, cioè:

**i.** la posizione delle faglie attive e le loro caratteristiche (per esempio, la magnitudo massima ed il meccanismo di rottura),

**ii.** le proprietà meccaniche dei diversi materiali presenti all'interno della zona d'interesse,

**iii.** la forma geometrica delle discontinuità (l'interfaccia letto roccioso/sedimenti soffici), è ora possibile effettuare l'esperimento al computer e simulare quello che accadrebbe se un sisma di magnitudo pari a 6.0 (di poco inferiore al recente terremoto dell'Aquila) si generasse lungo la faglia di Belledonne, nella zona nord orientale del bacino. Nella figura 3 vengono presentate alcune istantanee delle onde sismiche (in questo caso la velocità del terreno in direzione ortogonale alla faglia) propagate durante una delle simulazioni. L'intero filmato può essere visionato presso il sito del codice di calcolo GeoELSE. Come si vede nella figura 3, le onde si propagano in entrambe le direzioni (nord-est e sud-ovest), ma il loro comportamento è profondamente diverso: il

fronte a nord-est rimane pressoché inalterato e continua ad avere forma circolare, quello a sud ovest incontra i materiali soffici del bacino alluvionale e modifica la sua forma. Da un lato l'onda è costretta a rallentare all'interno di questi depositi producendo un'amplificazione del moto del suolo, dall'altro la forma tridimensionale del bacino innesca una serie di riflessioni e rifrazioni complicando notevolmente il campo di moto.

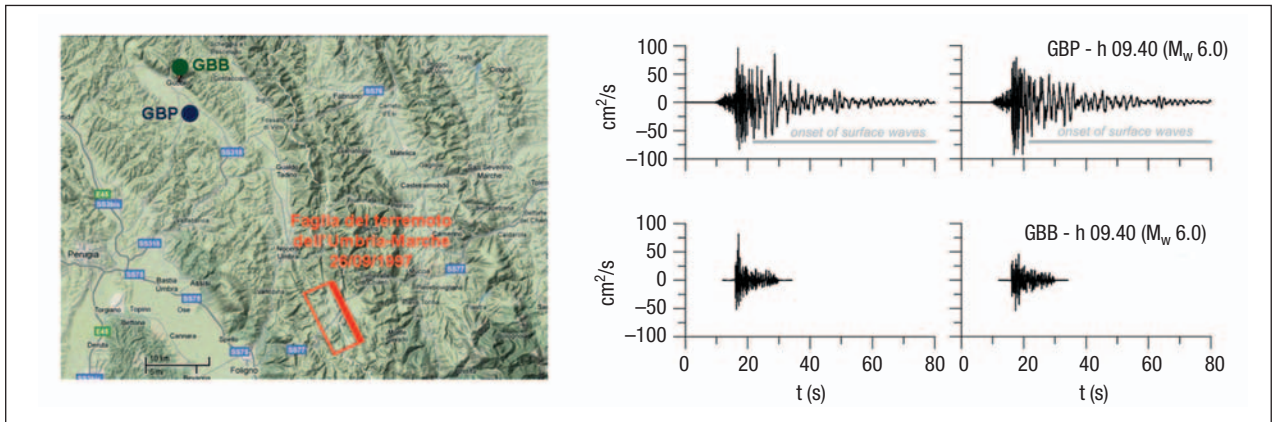
L'effetto appena descritto è ben noto e spesso viene ricordato l'esempio di città del Messico dove nel 1985 un sisma originatosi a circa 250 km di distanza produsse effetti devastanti nella capitale messicana. Il fenomeno è facilmente spiegabile ai nostri giorni ed è del tutto analogo a quanto appena mostrato per Grenoble: Città del Messico è infatti costruita su di un terreno che un tempo ospitava un lago, successivamente prosciugatosi. I materiali soffici poggiano a loro volta su strati rigidi e si comportano come un amplificatore naturale del moto. Un ulteriore esempio è fornito dai dati ottenuti durante il terremoto dell'Umbria-Marche del 1997 (Figura 4). Il primo sismogramma è stato registrato su materiali rocciosi (stazione GBB) mentre il secondo su materiali soffici (stazione GBP). Si noti che la distanza tra la sorgente del sisma e le stazioni di registrazione è pressoché identica (i dati sono disponibili presso il sito [15]), mentre lo scuotimento risulta superiore in ampiezza e molto più prolungato nel tempo. Quest'ultimo effetto è dovuto alle riflessioni delle onde sismiche che restano "intrappolate" all'interno del bacino.

Lo studio del bacino di Grenoble non si è esaurito con la simulazione di un solo ipotetico evento; grazie ai calcolatori disponibili presso il "Consorzio Interuniversitario Lombardo per l'Elaborazione Automatica" (CILEA, [16]) si è potuto si-



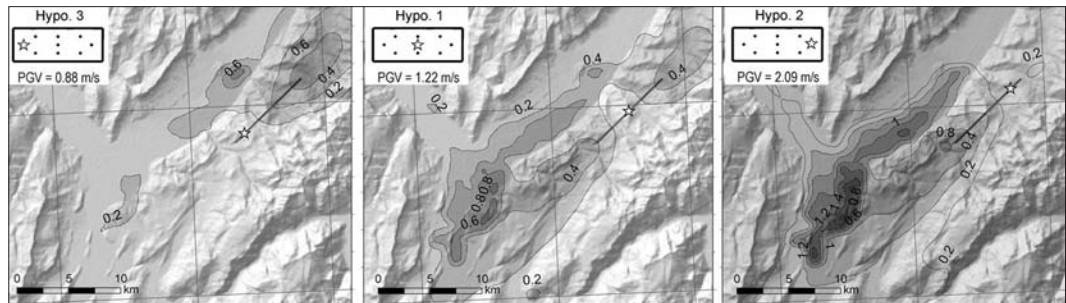
**FIGURA 3**

*Istantanee delle onde sismiche (componente della velocità ortogonale alla faglia) in tre successivi istanti temporali*



**FIGURA 4**

Posizione delle stazioni di Gubbio Piana (GBP) e Gubbio (GBB) durante l'evento sismico del 26 settembre 1997 (terremoto dell'Umbria-Marche). La prima stazione è collocata all'interno del bacino alluvionale su sedimenti soffici mentre la seconda su materiale rigido. A lato sono mostrate le registrazioni in accelerazione della componente EW e NS per l'evento principale delle ore 9.40 nelle due stazioni



**FIGURA 5**

Mappe della velocità massima registrata durante le tre simulazioni con diversa posizione dell'ipocentro lungo la faglia di Belledonne. Si noti l'impressionante differenza tra la simulazione "Hypo3" e quella "Hypo2". Entrambe sono equiprobabili per il livello di conoscenza attuale

mulare lo scuotimento al quale sarebbe sottoposta la città di Grenoble se si verificassero una serie di eventi tutti fisicamente ammissibili ma profondamente diversi tra loro. I risultati di alcune di queste simulazioni vengono presentati nella figura 5. In particolare si è analizzato l'effetto della posizione dell'ipocentro (punto di nucleazione della frattura) rispetto al valore massimo di scuotimento registrato durante l'intera analisi. Le mappe mostrano molto chiaramente che questo parametro gioca un ruolo fondamentale: se l'ipocentro è collocato a sud-ovest lungo la faglia (Hypo3) la rottura si sviluppa prevalentemente a nord-est e di conseguenza il bacino alluvionale non è soggetto a scuotimenti eccessivi, viceversa se l'ipocentro è collocato a nord-est lungo la faglia (Hypo2) notiamo che lo scuotimento è nettamente superiore nel bacino di Grenoble, con conseguenze facilmente immaginabili per l'abitato. La situazione

intermedia (Hypo1) è quella in cui l'ipocentro è collocato al centro della faglia dando luogo ad una rottura denominata "bilatera". Riassumendo, queste analisi ci permettono di studiare la fisica dell'evento e conoscere in anticipo l'effetto che alcuni parametri avranno sullo scuotimento che si verificherà. L'allineamento tra l'ipocentro, la traccia della faglia e l'abitato di Grenoble gioca un ruolo fondamentale per uno studio di rischio sismico. In modo analogo possono essere esaminati altri parametri e valutata la loro influenza. Ciascuna delle simulazioni presentate è stata fatta girare in circa 8 h su 64 processori, presso il cluster parallelo del CILEA denominato LAGRANGE. Chi fosse interessato alle caratteristiche della macchina, può visitare il sito del consorzio. Ovviamente può sorgere il più che legittimo dubbio sull'attendibilità di queste simulazioni. I recenti dati raccolti durante il sisma dell'Aqui-

la hanno parzialmente confermato che la modellazione sismica della valle di Grenoble può essere considerata attendibile e può fornire una base molto utile per lo studio del rischio sismico della città.

## 5. CONCLUSIONI

Per concludere questo breve “viaggio” che ci ha portato a descrivere la risposta sismica di una valle alpina, due sono le riflessioni da mettere in evidenza.

La prima riflessione parte dalla domanda che è stata posta in una recente pubblicazione da due famosi ricercatori: “abbiamo visto il peggio?” [17], intendendo con questo se sia già stato osservato o meno lo scuotimento più intenso ammissibile in un certo sito.

Il dubbio sorge spontaneo visto che non è nemmeno passato un secolo da quando venne registrato (13 Marzo 1932, terremoto di “Long Beach”) il primo sismogramma attraverso uno strumento appositamente progettato per questo compito. Da allora, le reti sismometriche si sono decisamente sviluppate su tutto il pianeta e alcune hanno oggi una densità rimarchevole come le reti giapponesi K-NET e KiK-net (rispettivamente in funzione dal 1996 e 1997). Ciononostante, la conclusione dei ricercatori è che sia improbabile che tutto quello che si può vedere, sia già stato visto. In altre parole, è molto probabile che i livelli massimi di scuotimento non siano ancora stati registrati.

A tale proposito le simulazioni numeriche, se opportunamente calibrate sulla base di dati reali, possono fornire delle preziose indicazioni su quello che in un futuro ci potremmo aspettare. Lo studio di scenari deterministici prodotti attraverso metodi numerici si sta diffondendo con crescente importanza e diversi progetti prevedono l'impiego di questo tipo di analisi per completare lacune e carenze nelle basi di dati di sismogrammi osservati. Il progetto TeraShake [18], ShakeOut [19] negli Stati Uniti o il progetto Cashima [20] in Europa sono entrambi esempi concreti di come la comunità scientifica sia sempre più attenta nei confronti di questi metodi e, in questa ottica, il ruolo dei centri di calcolo e di macchine ad alte prestazioni sarà sempre più importante.

Ovviamente, esistono anche dei forti limiti: per

effettuare delle simulazioni credibili si devono possedere una serie di dati che purtroppo al momento sono disponibili solo in un numero molto limitato di siti nel mondo (per esempio il bacino di Los Angeles, Tokyo, Taipei o in Italia il bacino alluvionale di Gubbio).

In ogni caso, la strada è tracciata e i problemi sopra menzionati possono essere superati solo grazie ad una stretta collaborazione tra i diversi istituti ed enti di ricerca, nazionali ed internazionali, mettendo queste informazioni a disposizione gli uni degli altri.

La seconda riflessione ha un carattere più generale: come si è osservato all'inizio del testo, lo sviluppo del calcolo automatico ha avuto impulso durante la seconda guerra mondiale, e ha registrato stimoli importanti negli anni della guerra fredda e della gara per la “conquista” della luna. Perfino le guerre, fra tanti orrori e atrocità, danno talvolta occasione a progressi tecnici importanti. Si può dire qualcosa di simile anche per il terremoto. La protezione civile rappresenta oggi la civiltà in uno dei suoi aspetti migliori. In linea di principio sembra ragionevole immaginare una difesa globale contro il terremoto, estesa a tutta l'area della prevenzione.

La modellazione della valle di Grenoble è un esempio significativo in questa ottica. Essa mostra la possibilità di una mappatura territoriale, mirata a valutare in modo sistematico il rischio sismico associato a ciascuna località. Questa a sua volta è la base indispensabile per la progettazione dei fabbricati nuovi e anche per l'adeguamento di quelli esistenti, in modo da sfruttare pienamente le possibilità offerte dalla tecnologia edilizia attuale (per esempio, strutture disaccoppiate con l'uso di smorzatori, oppure materiali compositi fibro-rinforzati).

Un piano di miglioramento della sicurezza sismica impone di ottimizzare l'allocazione delle limitate risorse disponibili secondo criteri razionali e quindi presuppone un'analisi del rischio quanto più accurata possibile, sia in termini statistici che deterministici. Scienza e tecnica rendono oggi disponibili gli strumenti per un'azione sistematica di questo genere; i risultati potrebbero essere paragonabili, a lungo termine, a quelli ottenuti nei secoli scorsi per il miglioramento delle condizioni igieniche e per la prevenzione dei grandi contagi.

Da ultimo preme sottolineare che, per tutti coloro che si occupano di rischio sismico, la speranza è creare una vera e propria cultura del rischio, cioè che vi sia coscienza da parte della popolazione del rischio sismico a cui è soggetta e che questo porti in un futuro possibilmente non troppo lontano a prestare maggiore attenzione ad una problematica ancora oggi spesso posta in secondo piano rispetto ad altre priorità.

### Bibliografia

- [1] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV): [www.ingv.it](http://www.ingv.it)
- [2] McGuire R.K.: Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 37, n. 3, 2008, p. 329-338.
- [3] Cornell C.A.: Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, n. 5, 1968, p. 1583-1606.
- [4] Pacific Earthquake Engineering Research Center: NGA Database: <http://peer.berkeley.edu/nga/>
- [5] Global Earthquake Model (GEM): [www.globalearthquakemodel.org](http://www.globalearthquakemodel.org)
- [6] Faccioli E., Maggio F., Paolucci R., Quarteroni A.: 2D and 3D elastic wave propagation by a pseudo-spectral domain decomposition method. *Journal of Seismology*, Vol. 1, 1997, p. 237-251.
- [7] Komatitsch D., Vilotte J.P.: The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 88, 1998, p. 368-392.
- [8] Chaljub E., Komatitsch D., Vilotte J.-P., Capdeville Y., Valette B., Festa G.: Spectral Element Analysis in Seismology, in *Advances in Wave Propagation in Heterogeneous Media*. Edited by Ru-Shan Wu and Valérie Maupin, *Advances in Geophysics, Elsevier*, Vol. 48, 2007, p. 365-419.
- [9] Codice di calcolo GeoELSE: <http://geoelse.stru.polimi.it>
- [10] Stupazzini M., Paolucci R., Igel H.: Near-Fault Earthquake Ground-Motion Simulation in the Grenoble Valley by a High-Performance Spectral Element Code. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, n. 1, 2009, p. 286 - 301.
- [11] Zienkiewicz O., Taylor R.L.: *The finite element method*. McGraw-Hill, London, Vol. 1, 1989.
- [12] QUEST (QUAntitative Estimation of Earth's Seismic Sources and Structure): <http://www.quest-itn.org/>
- [13] Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (LGIT) <http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/>
- [14] The CUBIT Tool Suite: <http://www.cubit.sandia.gov/>
- [15] ITACA - Italian ACcelerometric Archive: <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>
- [16] Supercomputing at CILEA: [www.supercomputing.it](http://www.supercomputing.it)
- [17] Strasser F.O., Bommer J.J.: Strong Ground Motions - Have We Seen the Worst? *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, n. 5, 2009, p. 2613-2637.
- [18] Progetto TeraShake: <http://scec.usc.edu/research/cme/groups/terashake>
- [19] Bielak J., Graves R.W., Olsen K.B., Taborda R., Ramírez-Guzmán L., Day S.M., Ely G.P., Roten D., Jordan T.H., Maechling P.J., Urbanic J., Juve G.: *The ShakeOut earthquake Scenario: Verification of three simulation sets, Submitted for publication*. 2009.
- [20] Ptilakis K.: EuroSeisTest report for the Cashima project, Technical report, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, Report distributed to the participants of the Cashima-Euroseistest Benchmark. 2008.

### Alcuni riferimenti sulla sismologia in generale per eventuali approfondimenti

- [21] Faccioli E., Paolucci R.: *Elementi di Sismologia applicata all'Ingegneria*. Pitagora Editore, (Italiano), 2005, p. 255.
- [22] Boschi E., Dragoni M.: *Sismologia*. UTET. (Italiano), 1999.
- [23] Aki K., Richards P.: *Quantitative Seismology. Theory and Methods*, Freeman, San Francisco. (Inglese), 1980.

MARCO STUPAZZINI ha conseguito il dottorato in Ingegneria sismica e geotecnica presso il Politecnico di Milano nel 2004, è stato Post-Doc presso la Ludwig Maximilians Universität di Monaco di Baviera nel quadro del progetto di ricerca europeo SPICE. Dal 2008 al 2009 ha preso servizio come ricercatore di Scienza delle Costruzioni presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano. Dal 2009 lavora presso la Munich RE, società leader mondiale nel settore riassicurativo, come sviluppatore di modelli per il rischio sismico. I suoi interessi di ricerca riguardano lo studio della risposta sismica all'interno di bacini alluvionali o domini tridimensionali complessi, il calcolo ad alte prestazioni, lo studio degli effetti sismici di "campo vicino" e l'interazione dinamica terreno-struttura.  
E-mail: MStupazzini@munichre.com