



notice du programme CHEs (Compute Hypocentral Events)

Haugmard Méric

meric.haugmard@univ-nantes.fr

6 décembre 2016

Le programme CHE, permet la *localisation hypocentrale* de séismes (longitudes, latitudes, profondeurs et temps initiaux) ainsi que la définition d'un *modèle de terre* (vitesse, profondeur des interfaces, ...) par un processus d'inversion stochastique de type Monte-Carlo, par chaînes de Markov, grâce aux données de temps d'arrivées des ondes directes (P_g et S_g) et réfractées (P_n et S_n) enregistrées sur un réseau local ou régional.

Objectifs :

1. localiser précisément les hypocentres des séismes, malgré :
 - un réseau peu dense ;
 - une sismicité diffuse (sans « cluster ») ;
 - une couverture azimutale tronquée (*p. e.* façade Atlantique) ;
 - absence d'un bulletin (c.-à.-d. d'une localisation *a priori*).
2. mettre à jour un *modèle de terre* dans une région où il est mal contraint, étudier ses variations latérales ;
3. valoriser les données du réseau temporaire local PYROPE ou de réseaux d'études post-séisme (séisme de Vannes, 21 novembre 2013).

détermination d'un nouveau jet de données :

dans DATA :

- DATA/yyyy.MM.jjThhmm.ss : fichiers avec les temps arrivées ;
- DATA/sac-*/yyyy.MM.jj.hh.mm.ZZ.STA.HHZ.SAC : un dossier par séisme (même ordre que DATA/-seismes.d) avec l'ensemble des formes d'ondes ;
- DATA/sta.d : fichiers avec les coordonnées des stations ;
- DATA/seismes.d : fichiers avec les séismes dans l'ordre, le nombre de lignes doit être égal à nbseismes ;
- DATA/files/catalogue.d : fichiers avec le(s) bulletin(s) des événements tectoniques.
- DATA/files/catalogue_non_tecto.d : fichiers avec le(s) bulletin(s) des événements non tectoniques.
- DATA/files/catalogue_SiHEX_all_Ma.d : fichiers avec le catalogue SiHEX des événements non tectoniques sur le Massif armoricain.
- DATA/files/catalogue_SiHEX_ke_FR.d : fichiers avec le catalogue SiHEX (?) des événements tectoniques en France.
- DATA/files/carriere.d : fichiers avec les coordonnées des carrières (Carrières et discrimination sismique, J. Fréchet & F. Thouvenot, octobre 2012).

dans PARAM :

- PARAM/iteration.d (choix du nombre d'itérations et du nombre de chaînes pour les coldruns et hotruns) ;
- PARAM/cerclesponderation.d (choix des cercles de pondération pour les différents séismes : même ordre que DATA/seismes.d) ;
- PARAM/priorIn.COLD.d (choix des bornes du prior pour les coldruns) ;
- PARAM/priorIn.HOT.d (choix des bornes du prior pour les hotruns).

dans SRC/makefile (choix du compilateur) :

- include macros/gfortran.d ;
- include macros/ifort.d.

dans SRC/MOD/modparam.f90 :

- indique le nombre de séisme : nbseismes ;
- choix de la méthode de tirage des paramètres ;
- choix du prior ;
- choix du calcul ou non des résidus aux stations ;
- choix d'un générateur de nombre aléatoire fixe ou libre ;
- choix d'affichage des traces sur hodochrones et du calcul de la magnitude M_d ;
- choix de la prise en compte des cercles de pondération xmin et xmax ;
- choix de l'écart minimal de temps entre deux stations pour la recherche initiale.
- choix d'un moho fabulaire ou non .

puis executer le programme ./run.it.sh.

modélisation

Afin de relocaliser un séisme, on recherche quatre paramètres : la longitude (ϕ) et la latitude (λ) de l'épicentre ainsi que la profondeur (h_z) et l'heure d'origine (t_0) du séisme. Le modèle de terre est défini par quatre paramètres : les vitesses moyennes des ondes P dans la croûte (α_1) et dans le manteau (α_n), la profondeur du moho (z_n) et le ratio de vitesses moyen le long du profil 1-D ($\frac{\alpha}{\beta}$).

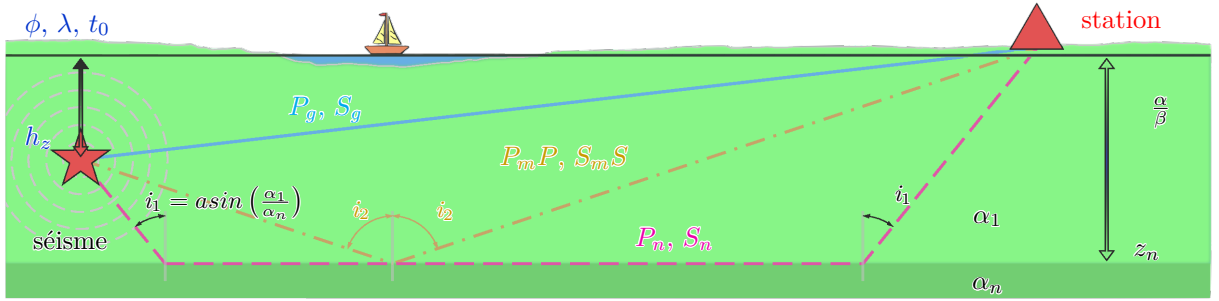
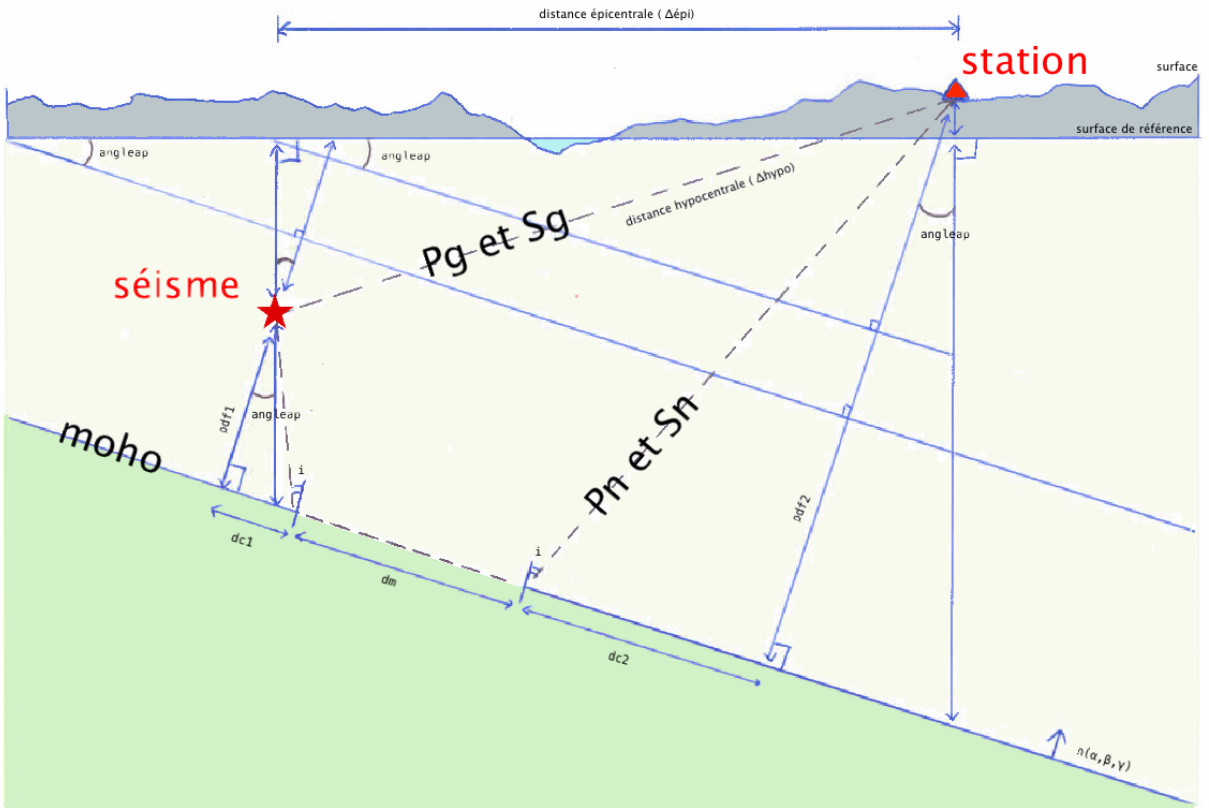


FIGURE 1 – trajet des ondes pour un séisme et une station

- λ : longitude de l'épicentre [$^\circ$] entre -90, 0° et 90, 0°
- ϕ : longitude de l'épicentre [$^\circ$] entre -180, 0° et 180, 0°
- α_1 : vitesse des ondes compressives dans la croûte [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]
- α_n : vitesse des ondes compressives dans le manteau [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]
- z_n : profondeur du moho [km]
- h_z : profondeur de l'hypocentre [km]
- t_{hypo} : temps initial [s]
- $\frac{\alpha}{\beta}$: ratio des ondes compressives sur les ondes cisailantes [-]

Pour un Moho penché :



Implémentation

L'ensemble du code est écrit en Fortran (norme 1995-2003, compiler avec *gfortran* ou *ifort* – parallélisé via [MPI](#)). Il se décompose en 18 programmes principaux, exécutables en cascade via les scripts [run_it.sh](#) ([SRC/run.sh](#)) :

- 1) [che_coldruns_init.f90](#) (initialisation des coldruns) ;
- 2) [che_coldruns.f90](#) (production des coldruns, utilise [MPI](#)) ;
- 3) [che_coldruns_syn.f90](#) (synthèse des coldruns) ;
- 4) [che_hotruns_init.f90](#) (initialisation des hotruns) ;
- 5) [che_hotruns.f90](#) (production des hotruns, utilise [MPI](#)) ;
- 6) [che_hotruns_syn.f90](#) (synthèse des hotruns) ;
- 7) [che_apriori.f90](#) (études des distributions *a priori* des paramètres, utilise [MPI](#)) ;
- 8) [che_plot.f90](#) (études des distributions *a posteriori* des paramètres et production des scripts pour l'édition des figures).

Sept autres programmes principaux accompagnent les précédents :

- 9) [sac_bin2txt.f90](#) (utilisé lors de l'édition des figures) ;
- 10) [sac_coda.f90](#) (calcul des magnitudes de durées, utilisé lors de l'édition des figures) ;
- 11) [sac_readpick.f90](#) (permet l'acquisition des données au bon format, utilisé via le script [DATA/ppk.sh](#)).
- 12) [sac_writepick.f90](#) (repositionne les temps d'arrivées sur les formes d'ondes SAC).
- 13) [sac_writepickTheo.f90](#) (repositionne les temps d'arrivées théoriques sur les formes d'ondes SAC).
- 14) [sac_writepickCata.f90](#) (repositionne les temps d'arrivées du catalogue sur les formes d'ondes SAC).
- 15) [sac_spectre.f90](#) (dessine spectre autour onde P_g et S_g).
- 16) [sac_stalta_kurtosis.f90](#) (calcul du $\frac{STA}{LTA}$ et du *kurtosis* sur les formes d'ondes SAC).
- 17) [verifmediatrice.f90](#) (test sur la cohérence des temps d'arrivées).
- 18) [sac_ZNE_2_LQT.f90](#) (rotation des composantes $[\mathbf{Z}, \mathbf{N}, \mathbf{E}] \rightarrow [\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}]$).

Il s'articule en 34 modules ($\sim 23\,300$ lignes de code). Il se partitionne ensuite en ~ 149 sous-routines (privées ou publiques) permettant une souplesse de programmation pour de futurs aménagements. Les variables sont, le plus souvent possible, définies par des structures dérivées, parfois imbriquées (on identifie une vingtaine de types dérivés, pour la gestion des dates, des types de données, ...). Le code est lourdement commenté et accompagné de documents. Le temps d'exécution en parallèle varie de quelques secondes à quelques heures.

dépendances

1. compilateur fortran récent (*gfortran*, *ifort*) avec MPI
2. GMT (version 4.5.8, pas GMT 5)
3. L^AT_EX
4. *SAC* (Seismic Analysis Code)

Arborescence du programme CHE (Compute Hypocentral Events)

- rouge

:

exécutable, script bash, GMT (Generic Mapping Tools, ?)
script \LaTeX ou ForTran 2003
- bleu

:

fichiers d'entrée
- violet

:

modules, sousroutines et fonctions ForTran 2003
- vert

:

fichiers de sortie
- orange

:

format entrées – sorties

CHE

- BIN

che.coldruns.init.exe

: exécutable programme principal PARTIE 1-1, initialisation

che.coldruns.exe

: exécutable programme principal PARTIE 1-2, échantillonnage à grande longueur d'onde, utilise [MPI](#)

che.coldruns.syn.exe

: exécutable programme principal PARTIE 1-3, synthèse

che.hotruns.init.exe

: exécutable programme principal PARTIE 2-1, initialisation

che.hotruns.exe

: exécutable programme principal PARTIE 2, -2 échantillonnage des modèles a posteriori, utilise [MPI](#)

che.hotruns.syn.exe

: exécutable programme principal PARTIE 2-3, synthèse

che.apriori.exe

: exécutable programme principal PARTIE 3-1, études des distributions a priori des paramètres, utilise [MPI](#)

che.plot.exe

: exécutable programme principal PARTIE 3-2, traitement des résultats et production des figures

sac.coda.exe

: exécutable programme principal, calcul de la magnitude de durée, utilisé lors de l'édition des figures

sac.bin2txt.exe

: exécutable programme principal, conversion des fichiers .sac en .txt, utilisé lors de l'édition des figures

sac.readpick.exe

: exécutable programme principal, permet l'acquisition des données au bon format, utilisé via le script [DATA/ppk.sh](#)

sac.writepick.exe

: exécutable programme principal, repositionne les temps d'arrivées sur les formes d'ondes SAC

sac.writepickCata.exe

: exécutable programme principal, repositionne les temps d'arrivées du catalogue sur les formes d'ondes SAC

sac.writepickTheo.exe

: exécutable programme principal, repositionne les temps d'arrivées théoriques sur les formes d'ondes SAC

sac.spectre.exe

: exécutable programme principal, dessine spectre autour onde P_g et S_g

sac.stalta.kurtosis.exe

: exécutable programme principal, calcul du $\frac{STA}{LTA}$ et du kurtosis sur les formes d'ondes SAC

verifmediatrice.exe

: exécutable programme principal, test sur la cohérence des temps d'arrivées

sac.ZNE.2.LQT.exe

: rotation des composantes $[Z,N,E] \rightarrow [L,Q,T]$
- DATA
- newtemps.d

: données synthétiques calculées (et bruitées)

sta.d

: données sur les stations : nom station (a4) ; latitude [-90;90] ; longitude [-180;180] ; altitude [m] ; résidus à la station (réel, P_g , P_n , S_g , S_n)

seisme.d

: ordre des séismes

ppk.sh

: script bash pour la lecture des données à partir des fichiers au format SAC

AAAA.MM.JJThhmss.ss

: données réelles (un fichier par séisme) :

nom station (a4) ; onde (a1 : compressive [P]) ; onde (a1 : directe[G] ou réfracté [N]) ; qualité du pointé (i1) [0(bon), 1, 2, 3, 4(mauvais)] ;

(même ligne) année (i2) ; mois (i2) ; jour (i2) ; heure (i2) ; min (i2) ; arrivée des ondes P en secondes (f6.3) ;

(même ligne) si existe arrivée des ondes S en secondes (f6.3) ; onde (a1 : cisailante [S]) ; qualité du pointé (i1) [0, 1, 2, 3, 4]

(même ligne) incertitudes des ondes P en secondes (f6.3) ; des ondes S en secondes (f6.3) ;

files

catalogue.d

: catalogue BCSF (Bureau Central Sismologique Français), de la sismicité du Massif armoricain

temps initial : année (i4) ; mois (i2) ; jour (i2) ; heure (i2) ; min (i2) ; seconde (f5.3)

(même ligne) latitude [-90;90] ; longitude [-180;180] ; magnitude [M_L] ; profondeur [km] ; nom [p. ex. « bcsf » (a20)]

catalogue_non.tecto.d

: catalogue SiHEX (?) des événements non tectoniques

catalogue_SiHEX.ke.FR.d

: catalogue SiHEX (?) des événements tectoniques en France

catalogue_SiHEX.all.Ma.d

: catalogue SiHEX des événements non tectoniques sur le Massif armoricain

carriere.d

: coordonnées des carrières (Carrières et discrimination sismique, J. Fréchet & F. Thouvenot, octobre 2012)

sac-x et sacx

ensemble des formes d'ondes (ACC, VEL, DECON et/ou BRUTES), avec x le numéro du séisme (ordre : DATA/seisme.d)

exemple de fichier sac 2013.11.21.9.50.600.FR.B249.HHN.SAC

Synthétiques

catalogue.d, sta.d, AAAA.MM.JJThhmss.ss, ...
- DOC
- notice détaillée du programme CHE avec arborescence

ensemble des scripts ForTran réunis au format .pdf
- OLD
- anciens runs
- OUTPUT (nouveau dossier pour chaque run)
- figures : toutes les figures en .pdf

files

*.bin

: modèles par chaîne

Cold

In*.bin

: sortie de che.coldruns.init.exe

Out*.bin

: sortie de che.coldruns.syn.exe

Hot

In*.bin

: sortie de che.hotruns.init.exe

Out*.bin

: sortie de che.hotruns.syn.exe

Plot

apriori*.bin : densité de probabilité a priori

STA

*.bin : résidus aux stations si FLAGresSTA=*true*.

passCold2Hot.bin

passHot2Plot

mag-*.d : magnitudes de durée par séisme

GMT : scripts, données et figures au format .ps

LATEX : scripts au format .tex

input : sauvegarde des données et paramètres

copies de iteration.d, temps.d, newtemps.d et priorIn.d

LOG

alllog.d

: fichier log total

stderrlog.d

: fichier log erreurs

stdoutlog.d

: fichier log sortie standard

latexlog.d

: fichier log sortie standard de \LaTeX

gslog.d

: fichier log sortie standard de Ghostscript

XX_XX_XX_XXhXX.pdf : ensemble des résultats sous format .pdf

residus-*.d : type d'onde, nom station, longitude, latitude, résidus [s], pondération, distance hypocentre [km] et résidus [% de la distance]

PARAM

iteration.d

: nombre dechaînes de Markov, nombre d'itérations par chaînes de Markov pourcoldruns et hotruns

paramTerre.d

: paramètres liés au modèle de terre fixe (FLAGterre=*true*, dans les programmes principaux), sinon recherche dans le prior

paramHypo.d

: paramètres liés aux modèles hypocentaux fixes (FLAGhypo=*true*, dans les programmes principaux, sinon recherche dans le prior

cerclesponderation.d

: diamètres descercles de pondération utilisés *zmin* [km] et *zmax* [km] (ignorés si négatifs, ordre : DATA/seisme.d)

priorIn.COLD.d et priorIn.HOT.d

: valeur minimale, maximale et écart-type pour les paramètres de l'inversion (pour lescoldruns et hotruns) :

pour la vitesse dans lacroute (VC) [km.s⁻¹] ; pour la vitesse dans le manteau (VM) [km.s⁻¹] ;

pour la profondeur du moho (Zmoho) [km] ; pour le ratio le long du profil (VPVS) ;

pour la profondeur du séisme (Zhypo) [km] ;

écart-type de l'épicentre (Lon;Lat) [km] ; écart-type du temps initiale (Txéro) [s] .

SRC

FILES

bath1.bin

: topographie Massif armoricain

limitesMA

: coordonnées des limites du Massif armoricain

mytopo.cpt

: palette decouleur GMT pour la topo

Faillles.xyz

: coordonnées de failles sur le Massif armoricain

MntArmor.grd

: modèle numérique de terrain (MNT) du Massif armoricain

lib

*.mod et *.o : modules et objets (après compilation)

macros

gfortran.d

: options de compilation pour gfortran lues par le makefile

ifort.d

: options de compilation pour ifort lues par le makefile

MES

message1.d et message2.d : messages lors de la compilation

MOD (modules.f90)

MOD-LaTeX

mklatex.f90

: latexscript (latexfull)

MOD-GMT

mkfcout.f90

: figure.GMTfc (GMT-fc, histogramme de la fonction coût)

mkGMT.f90

: figure.GMT (GMTfull et affiche.temps.ref, représentation 2D de la fonction coût et des densités a posteriori, paramètre vs. paramètre)

mkhodo.f90

: figure.GMTthodo (GMT.Hodochrone, hodochrone, temps d'arrivées en fonction de la distance hypocentre) – appelle : **BIN/sac2txt.exe**

mkcoda.f90

: figure.GMTcoda (GMT.Coda, calcul de la Magnitude en fonction de la durée de la coda) – appelle : **BIN/CalCmag.exe**

mkmap.f90

: figure.GMTmap (GMT-map, carte des stations)

mkparamiter.f90

: figure.GMTpar (GMT.param et RVB, paramètre en fonction des itérations)

mkres.f90

: figure.GMTres (GMT_res et GMT_resSTA, cartes des résidus aux stations)

mkcarriere.f90

: figure.GMTcarriere (GMT_carriere, cartes statistiques de discrimination des tirs de carrières)

mkwada.f90

: figure.GMTwada (GMT_wadati)

mkchatelain.f90

: figure.GMTchat (GMT.chatelain)

mkmatricecorrel.f90

: figure.GMTmCorr (GMT.mCorr)

moho.inc.f90

: mkmoho.inc (GMT-moho)

mkposteriori.f90

: figure.posteriori (PosterioriExploration, GMT-posteriori.lonlat et GMT-posteriori)

MOD-Geiger

documents sur la méthode ??

subgeiger.f90 : imGEIGER (dogeiger, dogeigerone)

MOD_rand

article (? , mt19937ar.pdf) : générateur de nombre aléatoire

mt19937ar.f90 : mt19937 (initseed_, init_genrand, genrand.int32 – 31, genrand.real1 – 3, genrand.res53 et normal)

MOD_sac

mod.sac.io.f90 : sac.i.o (module SAC)

avancement.f90

: cpt.Temps (progress)

lectdata.f90

: datalecture (lectnbdta, lectdata, initR, mksynth, mksynthallsta, cerclespond et catalogue)

rechercheinit.f90

: recherchepi (zoneRecherche et initparam)

pbdirect.f90

: pb.direct (tempsTheoDirectone, tempsTheoDirectone.AUTRE, tempsTheoDirect, Wadatiplot, chatelainplot, pPn.sSn, reflechie2, reflexchie, refracte, refracte.mohovar et directe)

tracer.rais.f90

: ray_tracing (tracercays)

misfit.f90

: sub_misfit (ponderation, compute_misfitone et compute_misfit)

stat.f90

: statistiques (correlationaffpond, correlationpond, inv.normal.cumulative.distrib.func, Rpealc et autovariance)

time.f90

: time (tempzero, basetime, difftime, JDATE et GDATE)

types.f90

: type Temps (date_min, date_sec, date_secPS, stations, dataone, dataall, pond, parametre, parametres, parametresinv, diffusite

densityplot.one, densityplot, fcout, accept, seismes, coldmoyluns, coldmoy, ellip, residus, mvP1.2.Pall, mvPalL2.P1, alph2vect et vect2alph)

ensemble des structures dérivées utilisées par le programme

McMC.f90

: algo.metropolis (metropolis)

dellipsge.f90

: distance.epi (dellipsge)

intersect.f90

: dist_cercle (dist2c)

modparam.f90

: modparam (nbseismes, wi, wl, wr, π , rT, FLAGS, ... : définition du nombre d'octets par réel et entier, π , rayon de la terre et nombre de séismes)

printmess.f90

: affiche (print.mess.1-5 (bis), print.mess.fin, print.mess.finchainemin, print.mess.finchainemax, print.line et print.messchaîne)

subparam.f90

: sub_param (lect.prior, moycoldruns, init_div, calc_accept, lectparam, nb_mod_select, lect_mod_select, moy_mod_select, mediane, dist_apriori, paramfize, inR et outR)

tirage.f90

: tirage (reflexion, tirage_T, tirage_H et tirageUN)

tri.f90

: tri (tri_bulle, tridata, melangetab et triparam)

PROG

che.plot.f90

: programme principal PARTIE 3, traitement des résultats - production des figures

che.apriori.f90

: programme principal PARTIE 3, études des distributions a priori des paramètres

sac.bin2txt.f90

: programme principal, conversion des fichiers .sac en .txt – nécessite librairie sac.i.o de SAC

sac.coda.f90

: programme principal, calcul de la magnitude de durée – nécessite librairie sac.i.o de SAC

sac.readpick.f90

: programme principal, permet l'acquisition des données au bon format

sac.writepick.f90

: programme principal, repositionne les temps d'arrivées précédemment pointés sur les formes d'ondes SAC

sac.writepickTheo.f90

: programme principal, repositionne les temps d'arrivées théoriques sur les formes d'ondes SAC

sac.writepickCata.f90

: programme principal, repositionne les temps d'arrivées du catalogue sur les formes d'ondes SAC

sac.spectre.f90

: programme principal, dessine spectre autour onde P_g et S_g

sac.stalta.kurtosis.f90

: programme principal, calcul du $\frac{STA}{LTA}$ et du kurtosis sur les formes d'ondes SAC

verifmediatrice.f90

: programme principal, test sur la cohérence des temps d'arrivées

sac.ZNE.2.LQT.f90

: programme principal, rotation des composantes $[Z,N,E] \rightarrow [L,Q,T]$

coldruns

che.coldruns.init.f90

: programme principal PARTIE 1, initialisation

che.coldruns.f90

: programme principal PARTIE 1, échantillonnage à grande longueur d'onde

che.coldruns.syn.f90

: programme principal PARTIE 1, synthèse

hotrun

che.hotruns.init.f90

: programme principal PARTIE 2, initialisation

che.hotruns.f90

: programme principal PARTIE 2, échantillonnage des modèles a posteriori

che.hotruns.syn.f90

: programme principal PARTIE 2, synthèse

makefile

: permet la compilation (make all ou make che), vérification (make test), supprime (makeclear)

run.sh

: compile, exécute programme principal et scripts GMT et \LaTeX – appel : **BIN/che.coldruns.f90**, **BIN/che.hotruns.f90** et **BIN/che.plot.f90**

run_it.sh : lance ./SRC/run.sh avec un log de compilation – appel : **SRC/run.sh**

Références

- CARA, M., Y. CANSI, A. SCHLUPP, P. ARROUCAU, N. BÉTHOUX, E. BEUCLER, S. BRUNO, M. CALVET, S. CHEVROT, A. DEBOISSY, B. DELOUIS, M. DENIEUL, A. DESCHAMPS, C. DOUBRE, J. FRÉCHET, S. GODEY, O. GOLLE, M. GRUNBERG, J. GUILBERT, **Haugmard, M**, L. JENATTON, S. LAMBOTTE, D. LEOBAL, C. MARON, V. MENDEL, S. MERRER, M. MACQUET, A. MIGNAN, A. MOCQUET, M. NICOLAS, J. PERROT, B. POTIN, O. SANCHEZ, J.-P. SANTOIRE, O. SÈBE, M. SYLVANDER, F. THOUVENOT, J. VAN DER WOERD, & K. VAN DER WOERD (2015) : Si-hex: a new catalogue of instrumental seismicity for metropolitan france, *Bulletin de la Societe Geologique de France*, **186**(1), 3–19.
- GEIGER, L. (1910) : Herbstetimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten, *K. Gessell. Will. Goett*, **4**, 331–349.
- GEIGER, L. (1912) : Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, *Bulletin of St. Louis University*, **8**(1), 60–71.
- MATSUMOTO, M., & T. NISHIMURA (1998) : Mersenne twister : A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation* , **8**(1), 3–30.
- WESSEL, P., & W. H. F. SMITH (1998) : New, improved version of generic mapping tools released, *Eos Trans. AGU*, **79**(47), 579.