

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Traitement de signaux pour la détection de séismes et leur multilatération

Théorie, pratique et résultats

Dalibard Louis

7 avril 2025

Table des contenus

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

1 Séismes

2 Théorie

- DSP

- Modélisation de la propagation des ondes sismiques

- Multilatération

- Magnitude sismique

3 Résultats

- Tests

4 Bibliographie

Introduction

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

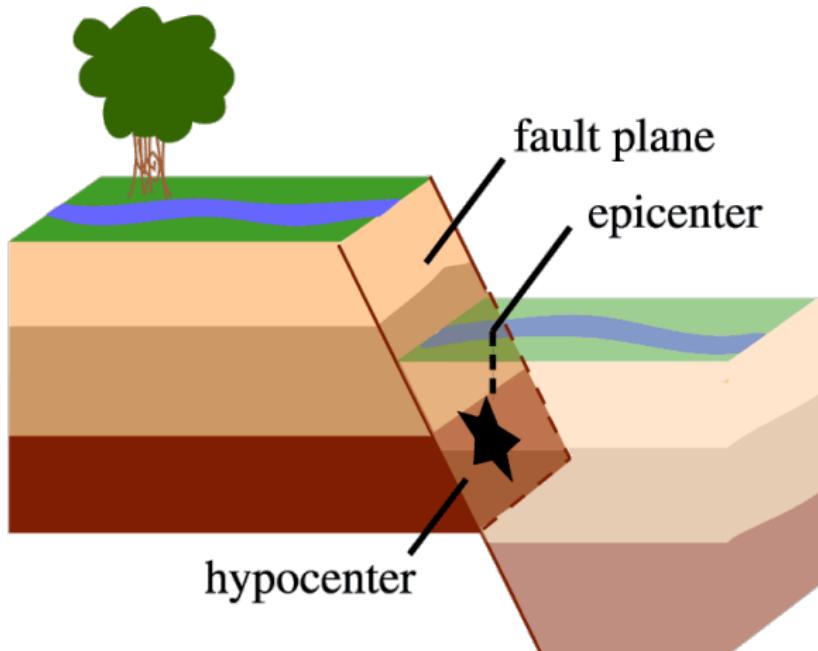
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



Ondes P et S

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

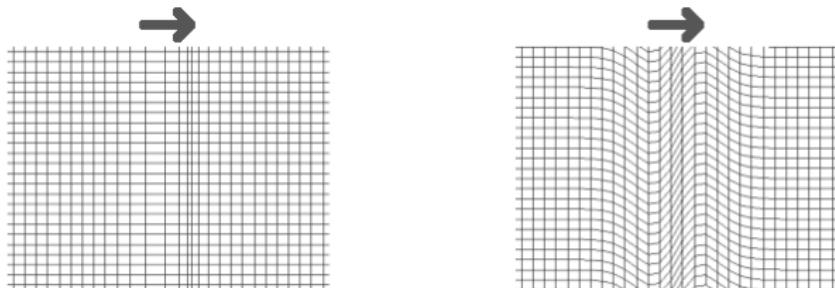
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



(a) Ondes P

(b) Ondes S

Figure – Ondes P et S

Ondes P et S

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

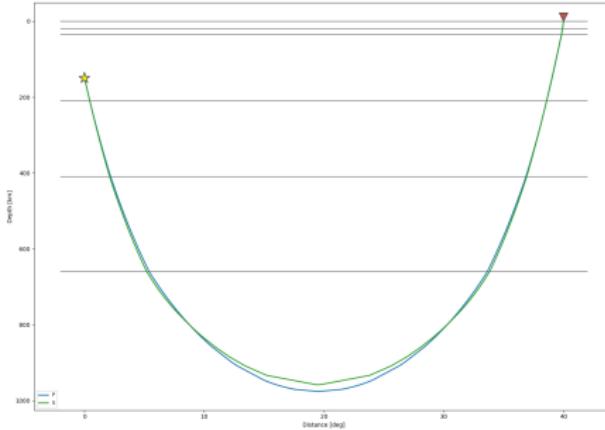


Figure – 6 km/s (ondes P) vs 4 km/s (ondes S)

Table des contenus

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

1 Séismes

2 Théorie

- DSP
- Modélisation de la propagation des ondes sismiques
- Multilatération
- Magnitude sismique

3 Résultats

- Tests

4 Bibliographie

Principe

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Différentes étapes :

- 1 Acquisition de données en temps réel (SeedLink)
- 2 Reconnaissance d'un séisme et mesure automatique des temps
- 3 Calcul de la position et de la magnitude
 - 1 Modélisation de la propagation des ondes sismiques
 - 2 Méthode numérique d'optimisation de fonction à plusieurs variables pour la multilatération
 - 3 Calcul de la magnitude

Acquisition des données

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Name	Host
AusPass	auspass.edu.au
BGR	eida.bgr.de
CISMID	www.cismid.uni.edu.pe
ENS	ephesite.ens.fr
...	...
Red Sismica Baru	helis.redsismicabaru.com
RESIF	rtserve.resif.fr
SANET	147.213.113.73
RSIS	rsis1.on.br
SCSN-USC (South Carolina Seismic Network)	eyore.seis.sc.edu:6382
Seisme IRD	rtserve.ird.nc
Staneo	vibrato.staneo.fr
SNAC NOA	snac.gein.noa.gr
TexNet	rtserve.beg.utexas.edu
Thai Meteorological Department	119.46.126.38
UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte)	sislink.geofisica.ufrn.br
Unical Universita Della Calabria	www.sismocal.org
UNITS Università degli studi di Trieste	rtweb.units.it
UNIV-AG Université des Antilles	seedsrv0.ovmp.martinique.univ-ag.fr
Universidade de Évora	clv-cge.uevora.pt
Universidad de Colima	148.213.24.15
UPR	worm.uprm.edu
USGS	cwbpub.cr.usgs.gov
USP-IAG	seisrequest.iag.usp.br

Extraction des temps d'arrivée

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

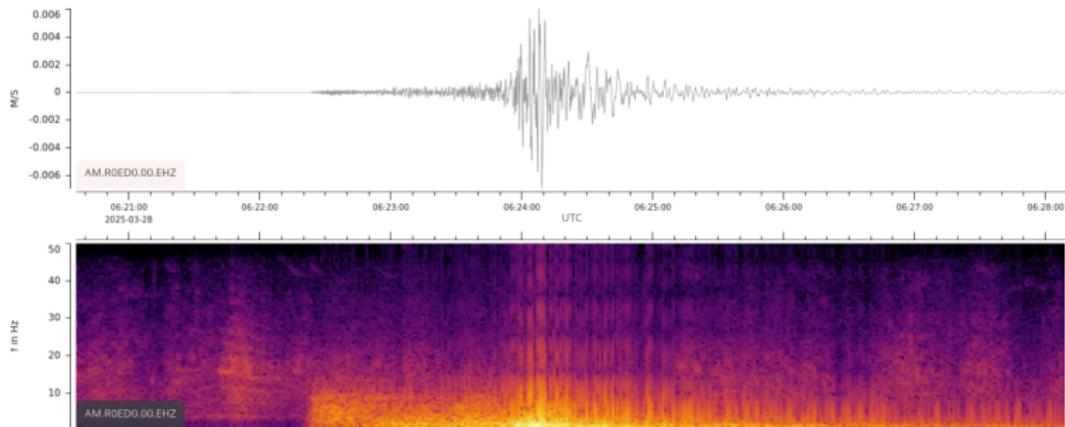


Figure – Exemple d'un enregistrement de sismographe

Convolution

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

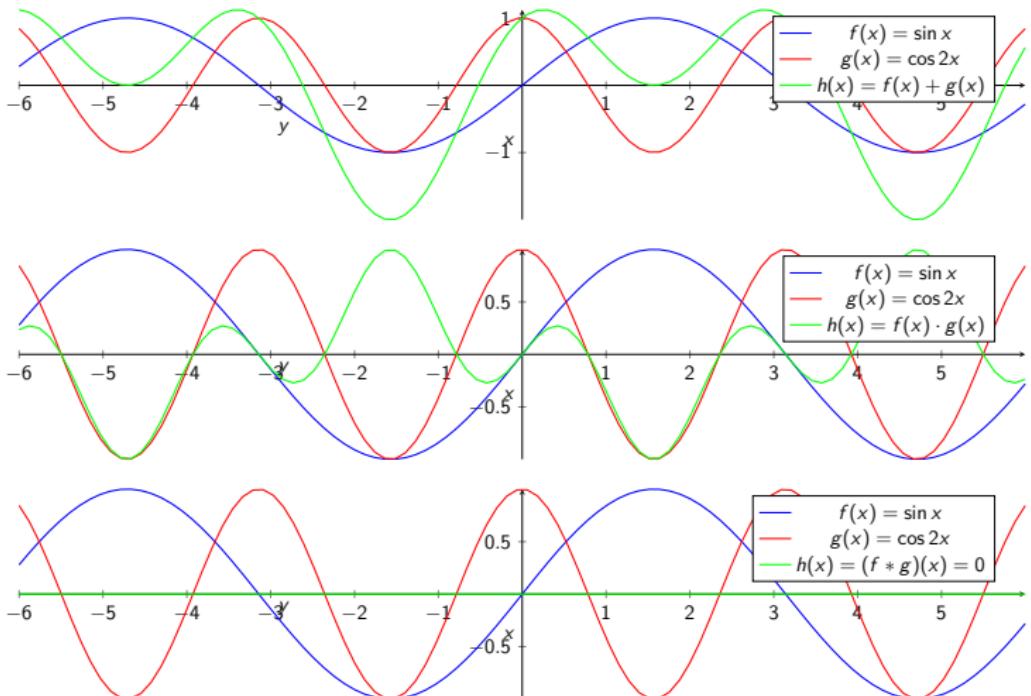
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



Convolution

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Soit f et g deux fonctions intégrables sur \mathbb{R} . Pour tout $t \in \mathbb{R}$,

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(t - x) dx$$

Soit f et g deux fonctions de \mathbb{Z} dans \mathbb{C} . Pour tout $n \in \mathbb{Z}$,

$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} f[m] \cdot g[n - m]$$

Pour des fonctions périodiques, on intègre sur une période.

Pour tout $t \in \mathbb{R}$,

$$(f * g)(t) = \int_0^T f(x) \cdot g(t - x) dx$$

Propriétés algébriques de la convolution

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie
DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération
Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

■ Commutatif

On remarquera que si

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(t - x) dx$$

Et on fait le changement de variable $u = t - x$

On a

$$\begin{aligned} (f * g)(t) &= \int_{+\infty}^{-\infty} f(t - u) \cdot g(u) - du \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - u) \cdot g(u) du = (g * f)(t) \end{aligned}$$

Propriétés algébriques de la convolution

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie
DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

■ Distributif

$$f * (g + h) = f * g + f * h$$

Par linéarité de l'intégrale.

■ Associatif

$$(f * g) * h = f * (g * h)$$

C'est une conséquence du théorème de Fubini.

L'espace des fonctions intégrables muni de $*$ forme un demi-groupe commutatif (car pas d'élément neutre).

Exemple avec des combinaisons de dés

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Somme donnant 2 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Somme donnant 3 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Somme donnant 4 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Somme donnant 5 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Exemple avec des combinaisons de dés

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Somme donnant 6 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Somme donnant 7 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Somme donnant 8 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Somme donnant 9 :

1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1

Exemple avec des combinaisons de dés

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Somme donnant 10 :

1	2	3	4	5	6						
6	5	4	3	2	1						

Somme donnant 11 :

1	2	3	4	5	6						
6	5	4	3	2	1						

Somme donnant 12 :

1	2	3	4	5	6						
6	5	4	3	2	1						

Lien avec les convolutions

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie
DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

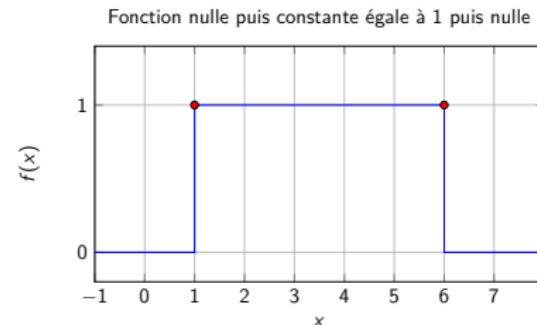
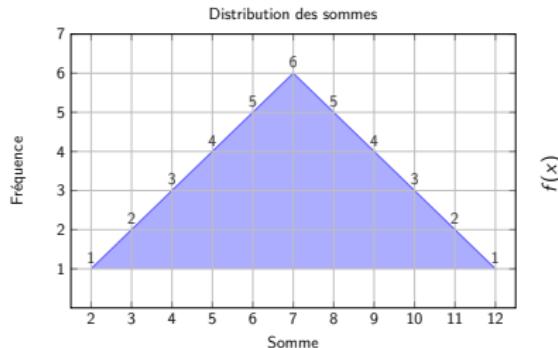
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



```
>>> np.convolve([0,1,1,1,1,1,1,0],[0,1,1,1,1,1,1,0])
array([0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0, 0])
```

Figure – numpy confirme ce résultat

Intuition sur la convolution

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

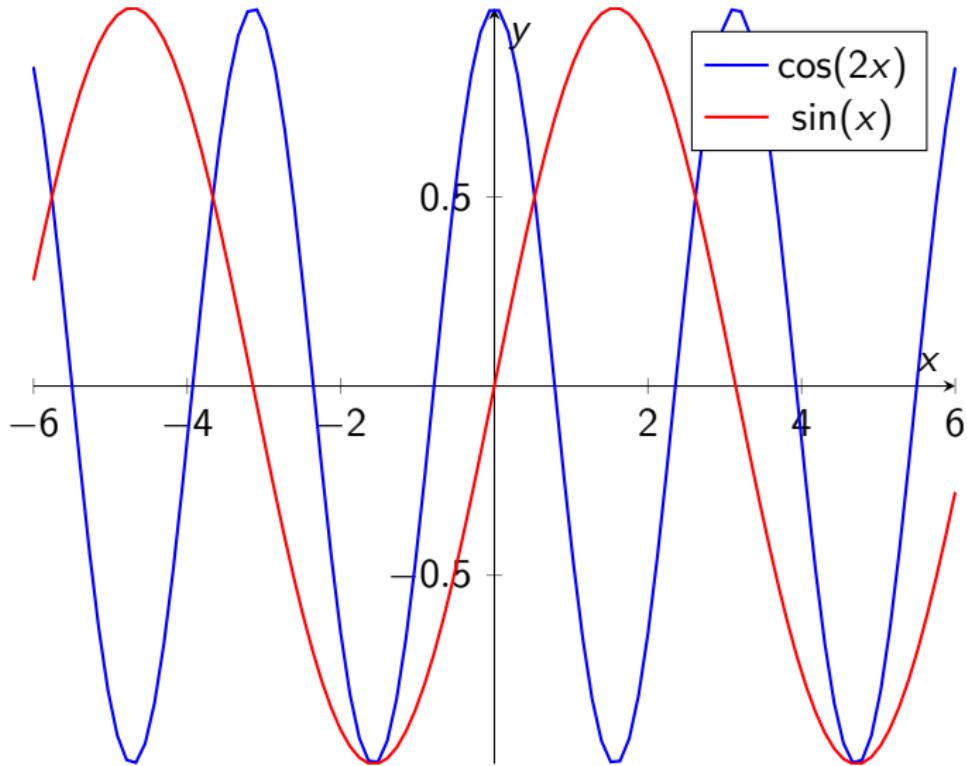
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



Intuition sur la convolution

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

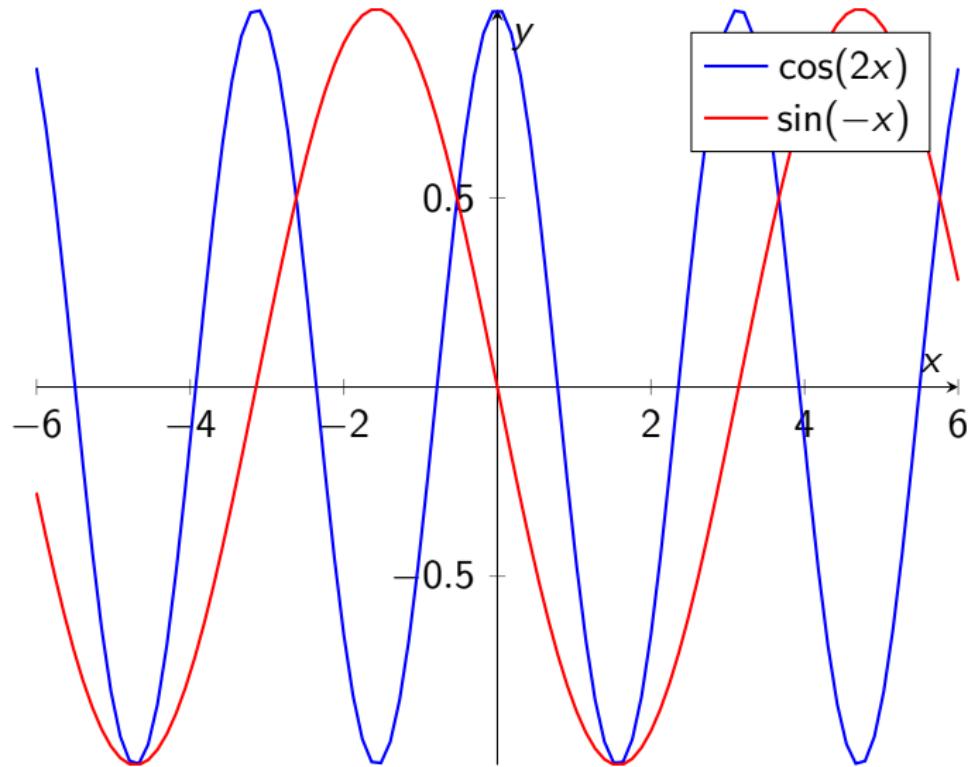
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



Intuition sur la convolution

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

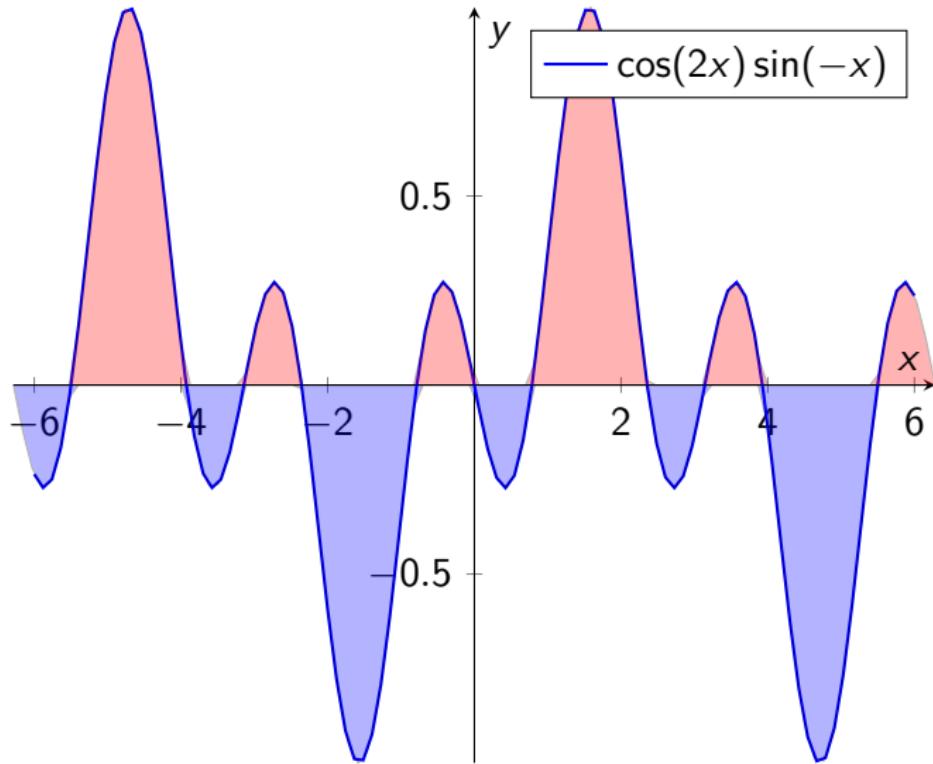
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



Moyennage

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

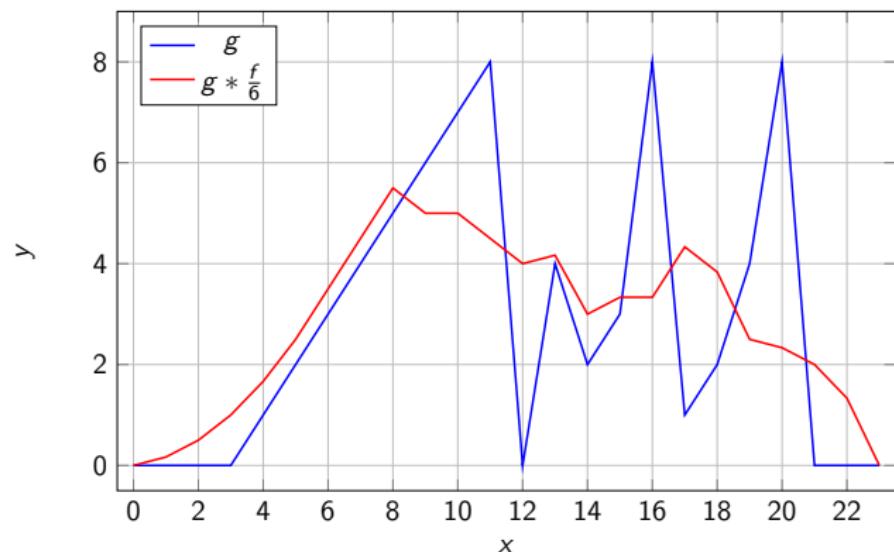
Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Moyennage par convolution



Transformée de Fourier discrète

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

$a = [a_0, a_1, \dots, a_{n-1}]$ et $b = [b_0, b_1, \dots, b_{k-1}]$

$$(a * b)[p] = \sum_{\substack{i \in \mathbb{Z} \\ 0 \leq p-i \leq k \\ 0 \leq i \leq n-1}} a_i b_{p-i}$$

$$P(X) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i X^i \text{ et } Q(X) = \sum_{j=0}^{k-1} a_j X^j$$

$(a * b)[p]$ est le coefficient du terme de degré p dans le produit :

$$PQ(X) = \sum_{j=0}^p \left(\sum_{\substack{i \in \mathbb{Z} \\ 0 \leq p-i \leq k-1 \\ 0 \leq i \leq n-1}} a_i b_{j-i} \right) X^j$$

On va évaluer en $\omega_n^k = e^{-\frac{2ki\pi}{n}}$ et utiliser la rigidité des polynômes.

Utilisation de la rigidité des polynômes

On va évaluer en $\omega_n^k = e^{-\frac{2ki\pi}{n}}$, multiplier deux à deux les résultats et utiliser la rigidité des polynômes pour récupérer les coefficients finaux.

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Radix-2 decimation-in-time (DIT) - Factorisation Cooley-Tukey

DSP et
Sismologie
Dalibard

Séismes
Théorie
DSP
Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques
Multilatération
Magnitude sismique

Résultats
Tests
Bibliographie

Evaluer notre polynôme $P(x) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i x^i$ en les ω_n^k revient à faire la multiplication matricielle suivante :

$$R = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(\omega_n^0) \\ P(\omega_n^1) \\ \vdots \\ P(\omega_n^{n-1}) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \omega_n^1 & \omega_n^2 & \cdots & \omega_n^{n-1} \\ 1 & \omega_n^2 & \omega_n^4 & \cdots & \omega_n^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_n^{n-1} & \omega_n^{2(n-1)} & \cdots & \omega_n^{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix}$$

Radix-2 decimation-in-time (DIT) - Factorisation Cooley-Tukey

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

On se restreint au cas où $n = 2^p$ ($p \in \mathbb{N}$)

On note la matrice de Vandermonde transposée, qui permet de calculer le DFT pour tous nos coefficients,

$$F_{2^p} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \omega_n^1 & \omega_n^2 & \cdots & \omega_n^{n-1} \\ 1 & \omega_n^2 & \omega_n^4 & \cdots & \omega_n^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_n^{n-1} & \omega_n^{2(n-1)} & \cdots & \omega_n^{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix}$$

On prend cette matrice diagonale,

$$D_{2^{p-1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_{2^{p-1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_{2^{p-1}}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \omega_{2^{p-1}}^{2^{p-1}-1} \end{bmatrix}$$

Radix-2 decimation-in-time (DIT) - Factorisation Cooley-Tukey

DSP et Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie DSP

Modélisation de la propagation des ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

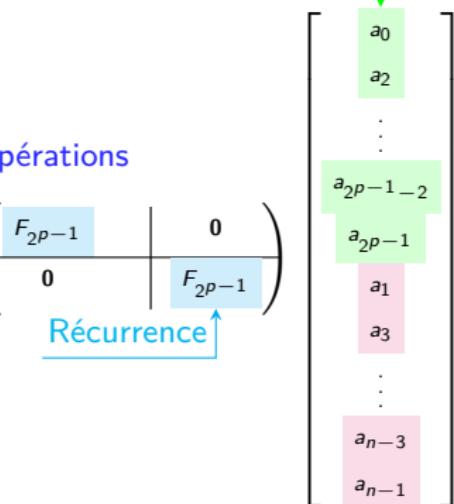
Blocs diagonaux, de l'ordre de $\mathcal{O}(n)$ opérations

$$R = F_{2p} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \left(\begin{array}{c|c} I_{2p-1} & D_{2p-1} \\ \hline I_{2p-1} & -D_{2p-1} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} F_{2p-1} & 0 \\ \hline 0 & F_{2p-1} \end{array} \right)$$

Récurrence

Coefficients d'indice pair

Coefficients d'indice impair



Radix-2 decimation-in-time (DIT) - Factorisation Cooley-Tukey

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie
DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

On évalue la compléxité de l'algorithme.

On note u_p sa complexité en fonction de p et C_n sa complexité en fonction de n .

Compléxité du produit sur la diagonale

$$u_{p+1} = A \cdot 2^{p+1} + 2u_p$$

Traitement des coefficients par récurrence

On factorise par la solution homogène, $\frac{u_{p+1}}{2^{p+1}} = A + \frac{u_p}{2^p}$

$$\frac{u_p}{2^p} = u_0 + A \cdot p$$

$$u_p = u_0 \cdot 2^p + A \cdot p \cdot 2^p$$

Or $p = \log_2 n$

Donc $C_n = u_{\log_2 n} = u_0 \cdot n + A \cdot \log_2 n \cdot n = \mathcal{O}(n \log n)$

IFFT

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

On peut montrer que :

$$F_{2^p}^{-1} = \frac{1}{2^p} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \overline{\omega_n}^1 & \overline{\omega_n}^2 & \cdots & \overline{\omega_n}^{n-1} \\ 1 & \overline{\omega_n}^2 & \overline{\omega_n}^4 & \cdots & \overline{\omega_n}^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \overline{\omega_n}^{n-1} & \overline{\omega_n}^{2(n-1)} & \cdots & \overline{\omega_n}^{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix}$$

Et on a :

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = F_{2^p}^{-1} R = F_{2^p}^{-1} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{bmatrix}$$

IFFT

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie
DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Le conjugué passe au produit et à la somme, donc aussi pour les matrices (prendre le conjugué d'une matrice c'est prendre le conjugué des termes de la matrice).

$$A = \overline{\overline{A}} = \overline{\overline{F_{2^p}^{-1} R}} = \overline{\overline{F_{2^p}^{-1}} \overline{R}} = \frac{1}{2^p} \overline{F_{2^p} \overline{R}}$$

On peut donc utiliser la même technique, en prenant le conjugué avant d'appliquer un FFT et en le prenant après puis en renormalisant.

Passage du domaine temporel au domaine fréquentiel

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Le fait de multiplier par ces coefficients spécifiques, revient à décomposer en ondes sinusoïdales de différentes fréquences et phases notre signal.

Corrélation croisée

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

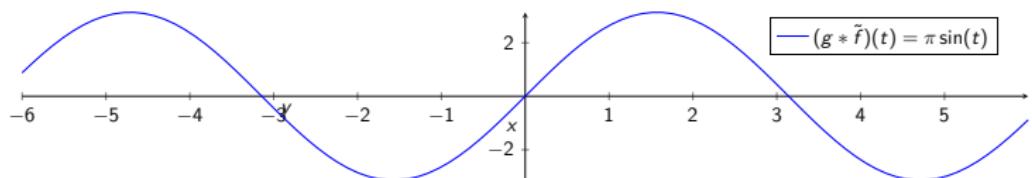
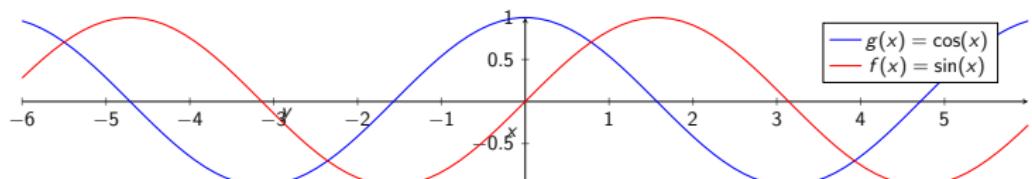
Tests

Bibliographie

Si on définit $\tilde{f}(t) = f(-t)$

La corrélation croisée de f et g est

$$(g * \tilde{f})(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{f(x-t)} g(x) dx$$



Calcul du temps de propagation selon iasp91

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

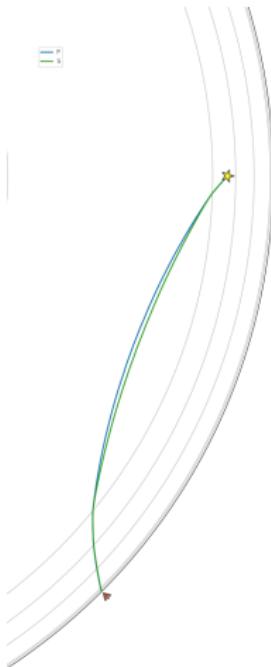
Multilatération

Magnitude sismique

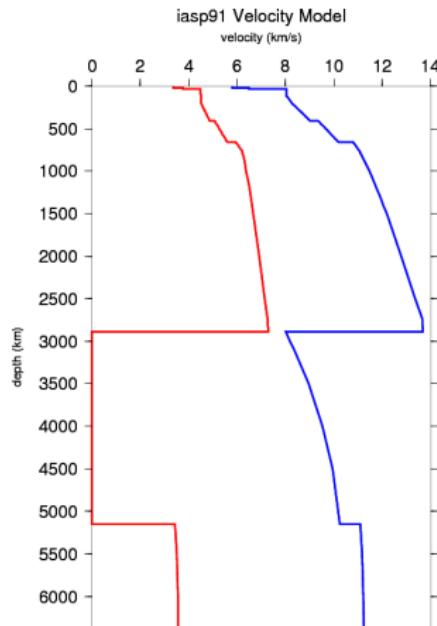
Résultats

Tests

Bibliographie



(a) TauPy



IRIS

IASP91 (Vs, km/s), Kennett & Engdahl, 1991, at (40.0, -120.0)
IASP91 (Vs, km/s), Kennett & Engdahl, 1991, at (40.0, -120.0)
www.iris.edu/dms/products/semc

(b)

Tabulation et interpolation

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

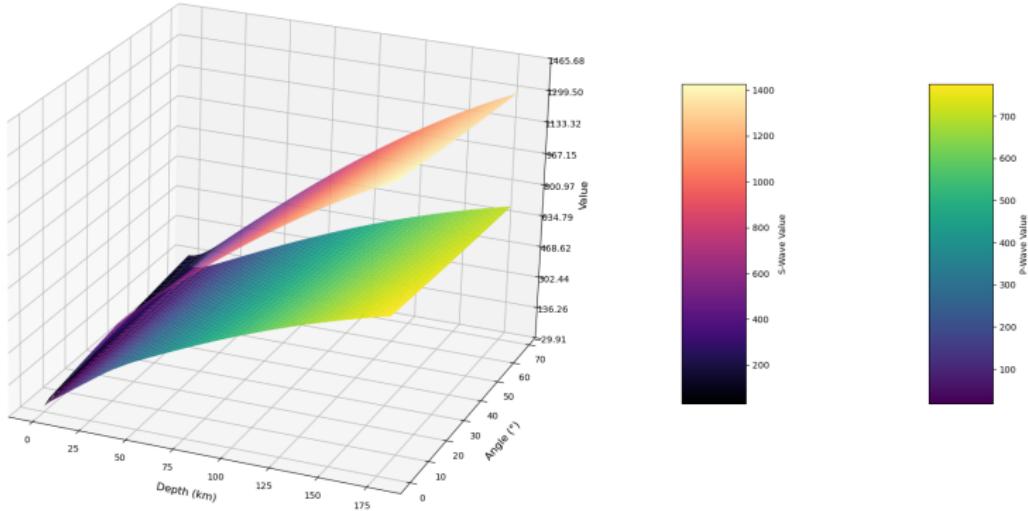


Figure – Visualization des deux tables précalculées

Fonction d'erreur

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

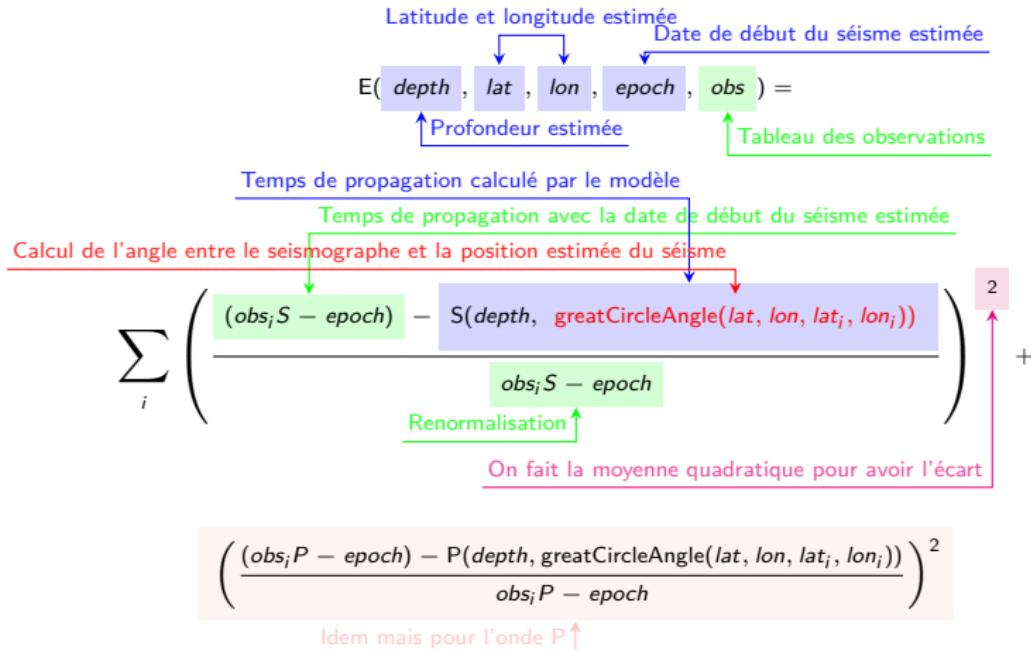
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



Implémentation de la fonction d'erreur

```
116 func ErrorFunction(observations *[]Observation, guess Guess) float64 {
117     cumulErrorSquared := 0.0
118     for _, observation := range *observations {
119         diffAngle := GreatCircleAngle(guess.Lat, guess.Lon, observation.Lat, observation.Lon)
120         pDelay := observation.PWaveArrival - guess.Epoch
121         sDelay := observation.SWaveArrival - guess.Epoch
122         cumulErrorSquared += Square((sDelay-InterpolateSWave(guess.Depth, diffAngle))/sDelay) + Square((pDelay-InterpolatePWave(guess.Depth, diffAngle))/pDelay)
123     }
124     return cumulErrorSquared // no unit
125 }
```

Figure – Implémentation de la fonction d'erreur

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Méthode de Nelder-Mead

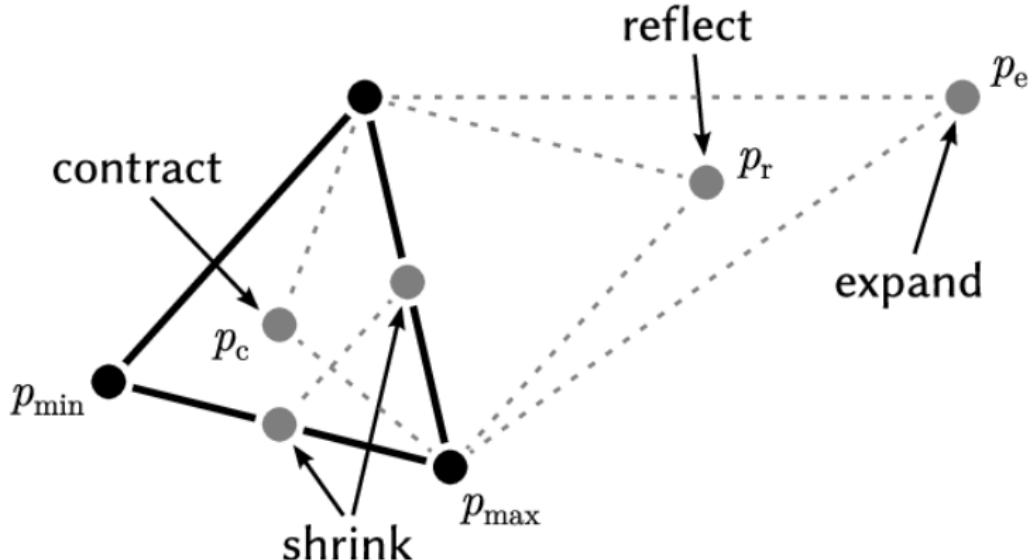


Figure – Une itération de Nelder-Mead sur un espace de dimension 2

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

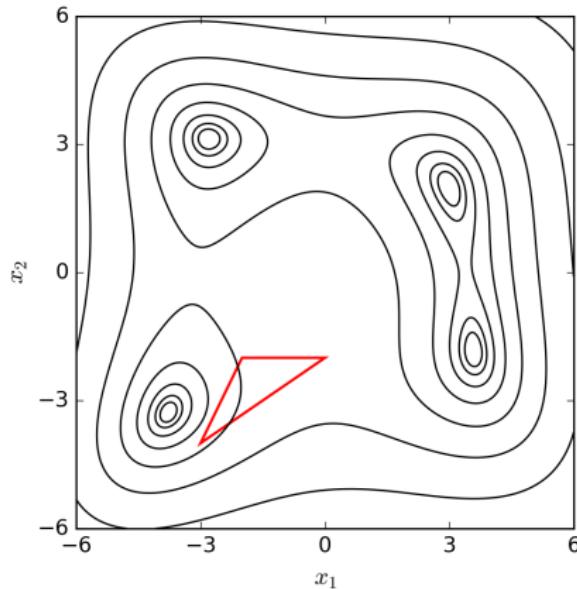


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

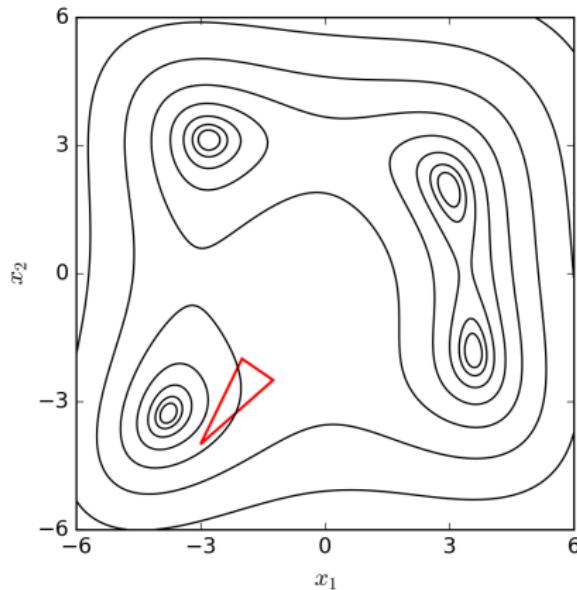


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

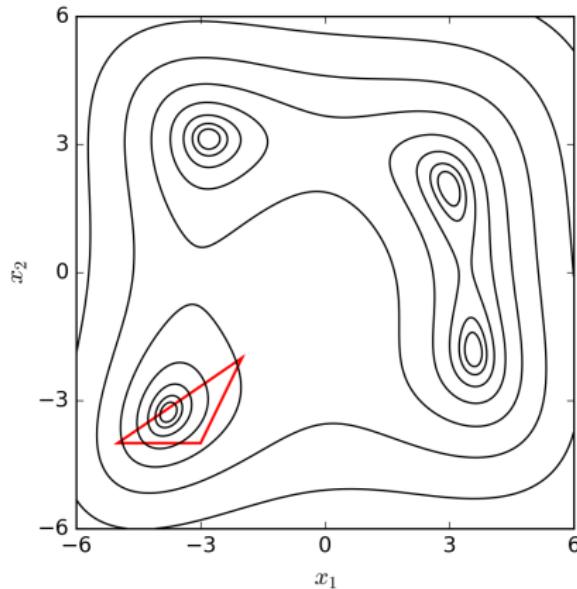


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

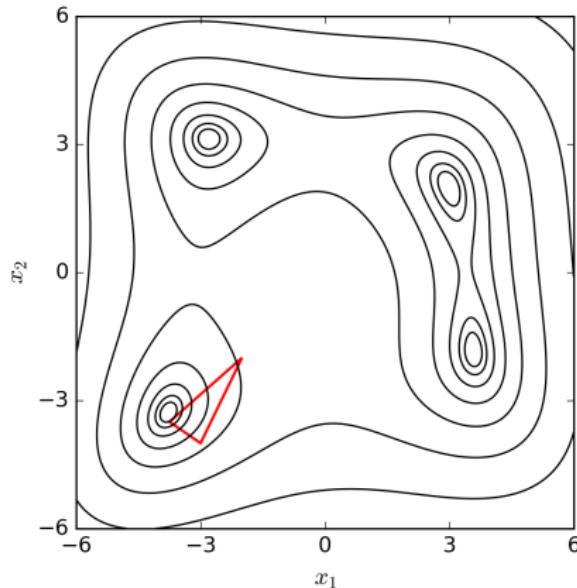


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

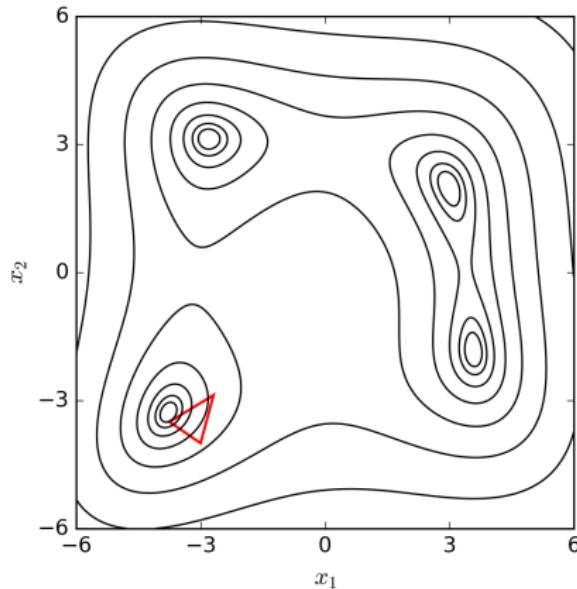


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

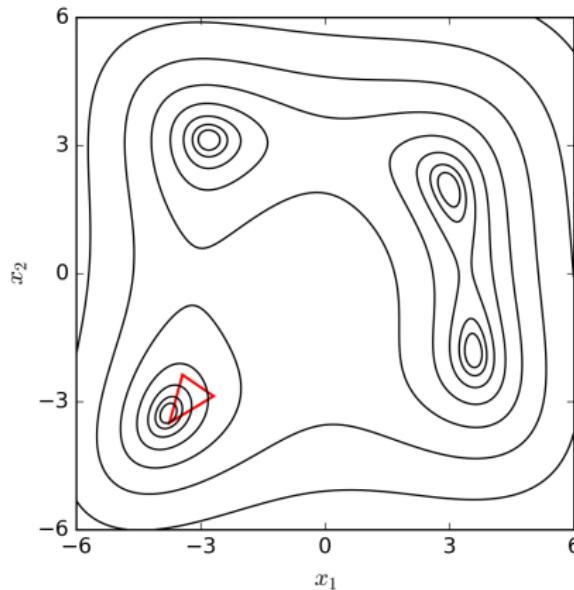


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

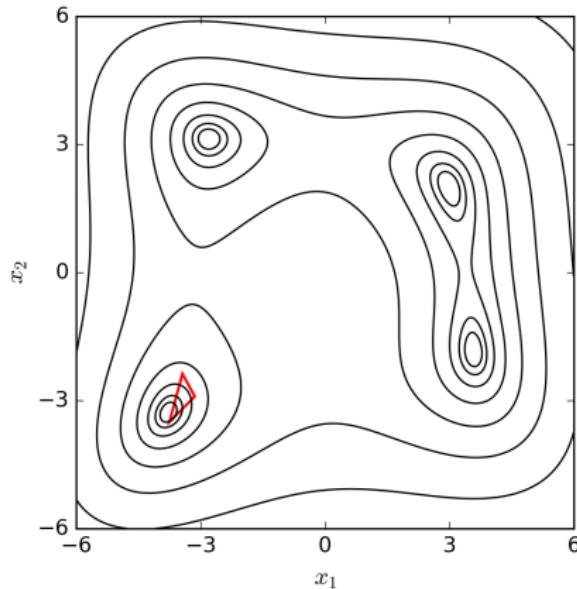


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

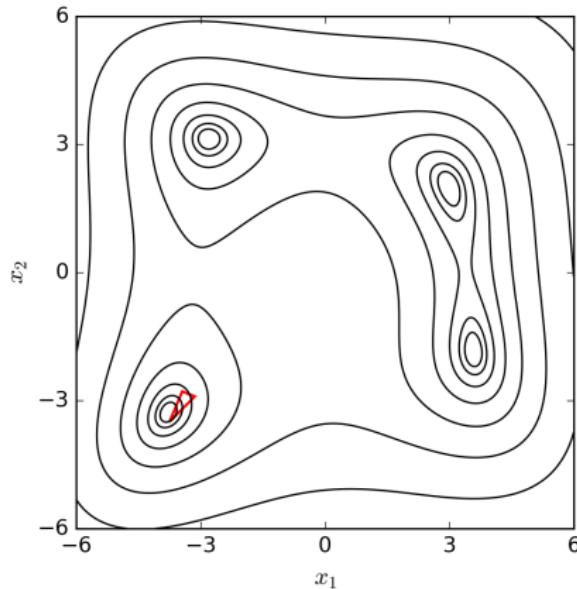


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

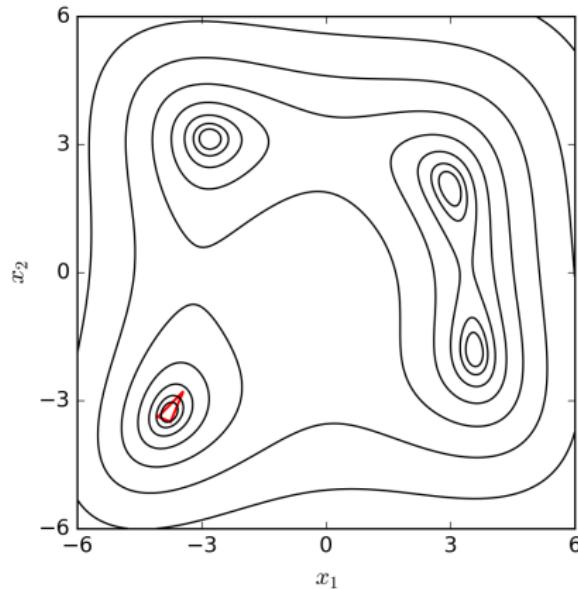


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

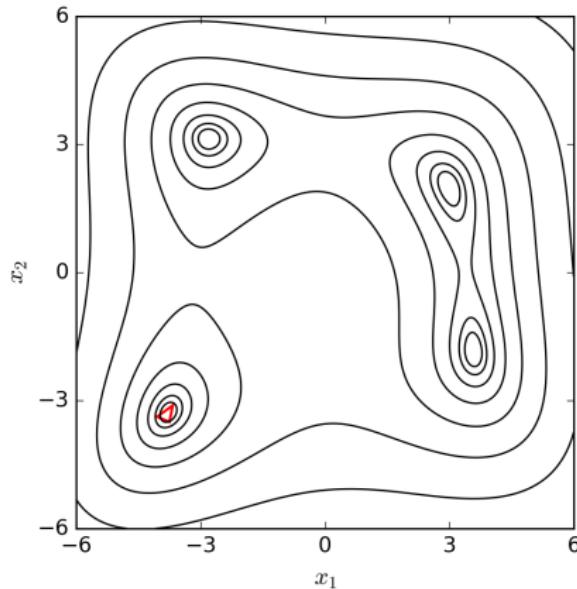


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

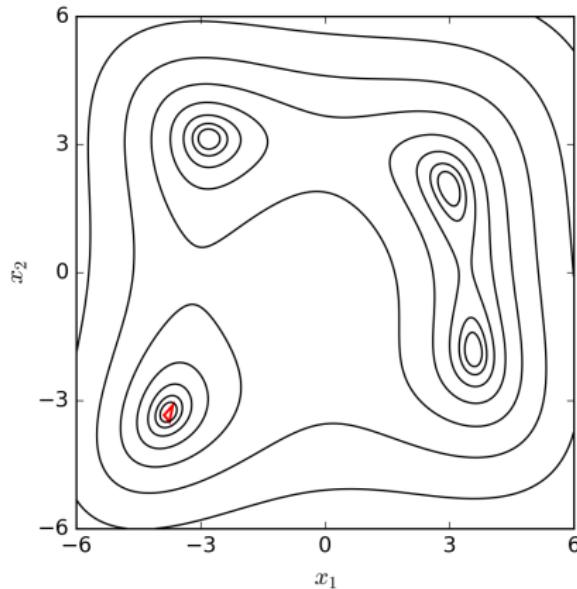


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

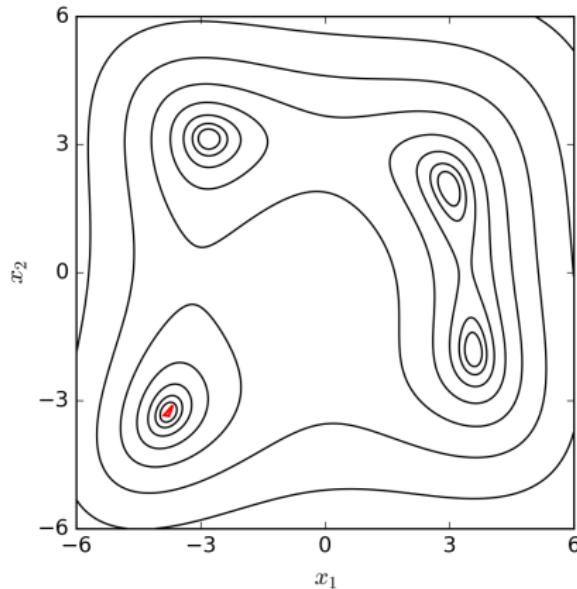


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

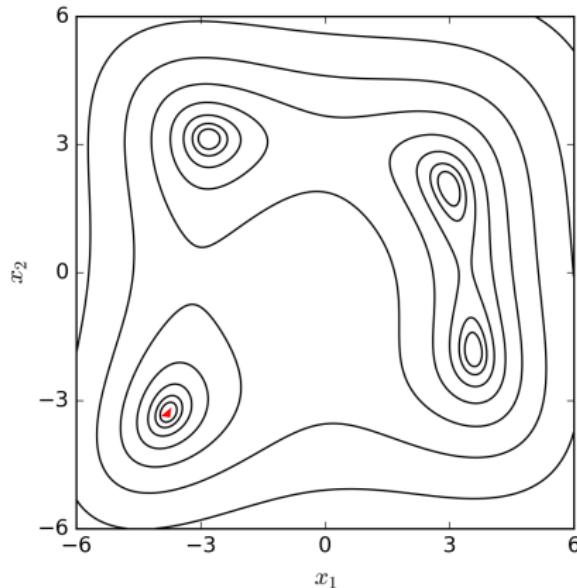


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

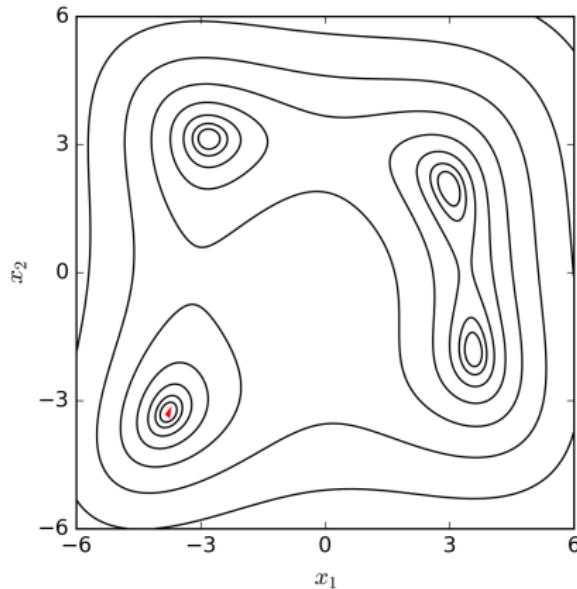


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

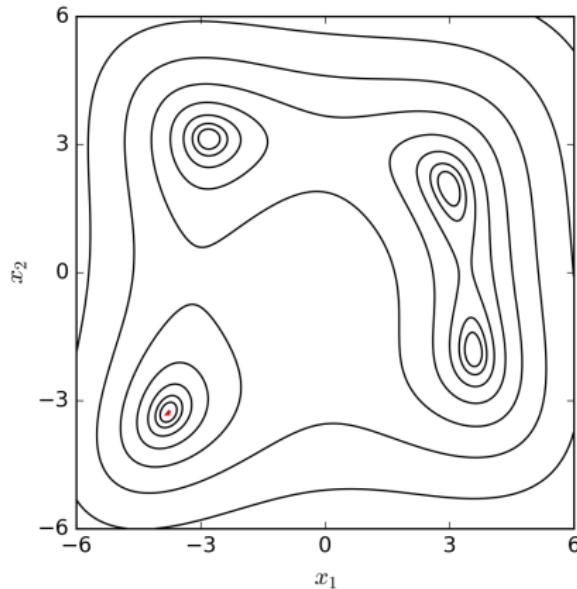


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

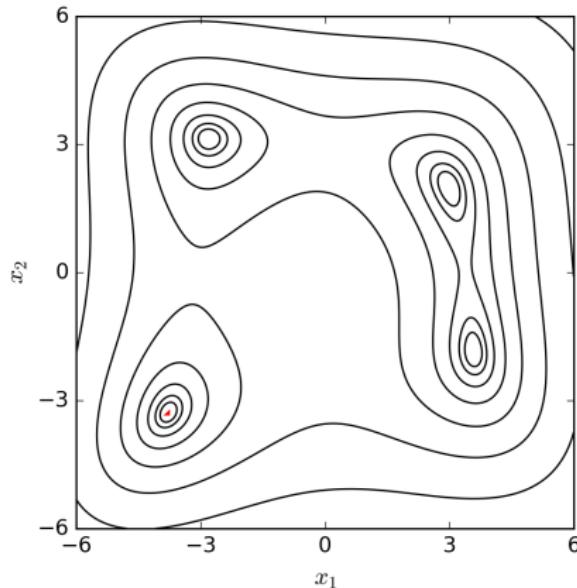


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

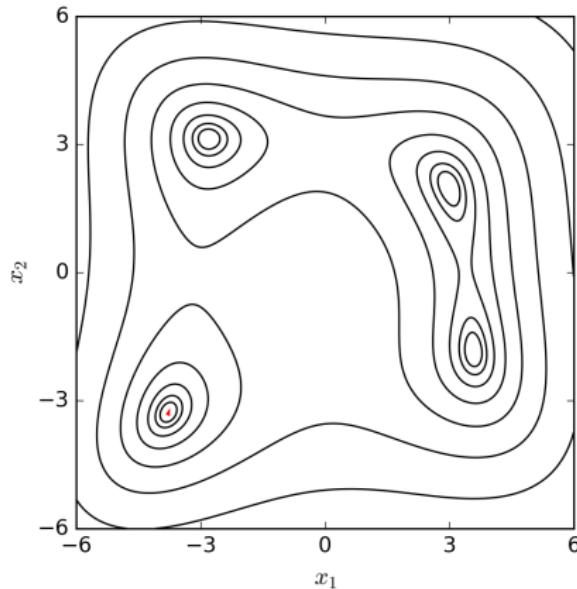


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

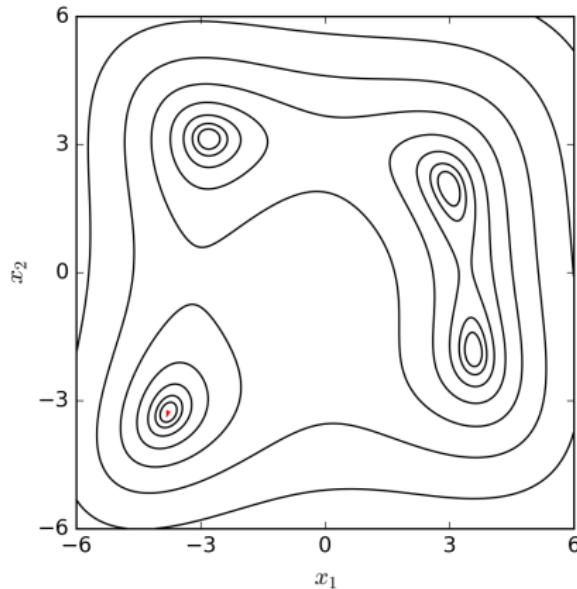


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

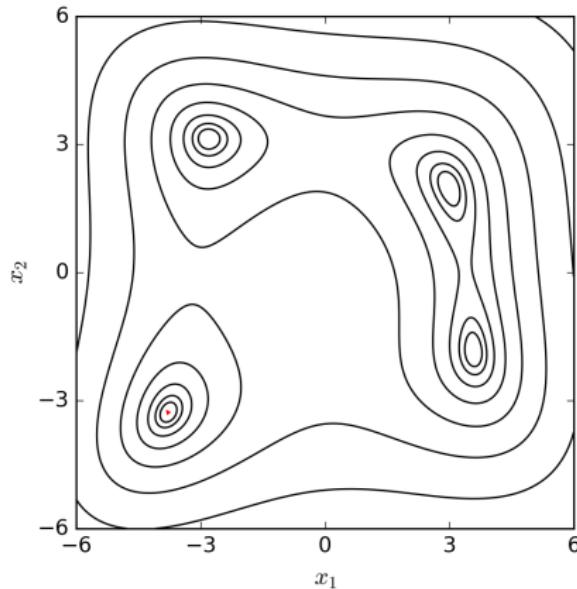


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Méthode de Nelder-Mead

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

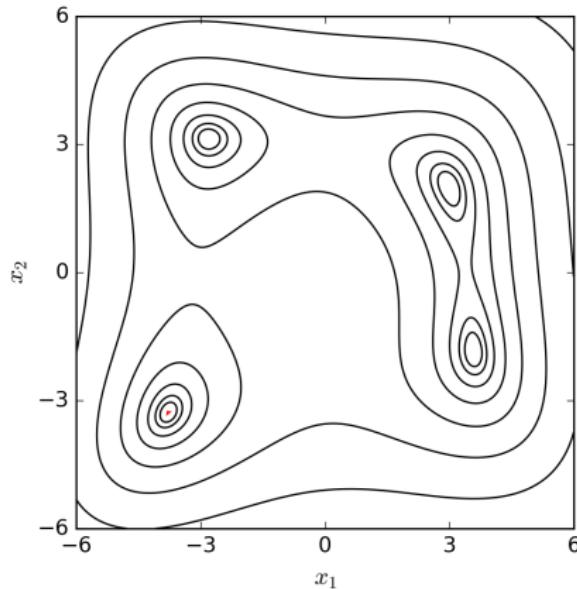


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

Formule de calcul de magnitude sur l'échelle Richter

$$M_L = \log_{10} \left[\frac{A}{A_0(\delta)} \right]$$

où A correspond à l'amplitude maximale mesurée (en m) par le sismographe et $A_0(\delta)$ un coefficient de correction qui dépend de la distance (δ) à l'épicentre et dont le calcul diffère selon les modèles employés (généralement on utilise une table de corrélation empirique).

On utilisera la formule empirique de Tsuboi (Université de Tokyo) :

$$M_L = \log_{10} A + 1.73 \log_{10} \Delta - 0.83$$

où A est l'amplitude en micromètres et Δ est la distance en kilomètres.

Tableau

DSP et Sismologie
Dalibard
Séismes
Théorie DSP
Modélisation de la propagation des ondes sismiques
Multilatération
Magnitude sismique
Résultats Tests
Bibliographie

Magnitude	Description	MMI Typique	Effets Moyens du Séisme
1.0 - 1.9	Micro	I	Micro-séismes, non ressentis. Enregistrés par les sismographes.
2.0 - 2.9	Mineur	I	Légèrement ressenti par certaines personnes. Aucun dommage aux bâtiments.
3.0 - 3.9	Léger	II à III	Souvent ressenti, mais cause rarement des dégâts. Secousses perceptibles d'objets à l'intérieur.
4.0 - 4.9	Faible	IV à V	Secousses intérieures notables et bruits de cliquetis. Légèrement ressenti à l'extérieur. Dégâts minimes possibles.
5.0 - 5.9	Modéré	VI à VII	Peut endommager les bâtiments mal construits ; ressenti par tous. Peu ou pas de dégâts aux bâtiments solides.
6.0 - 6.9	Fort	VII à IX	Dégâts modérés aux structures solides ; dégâts sévères aux structures faibles. Ressenti sur de grandes régions.
7.0 - 7.9	Majeur	VIII ou plus	Dégâts majeurs et effondrements possibles. Dommages concentrés dans un rayon de 250 km.
8.0 - 8.9	Très fort	VIII+	Destructions majeures à totales. Dommages sur des zones très vastes. Ressenti à très grande distance de l'épicentre.
9.0 - 9.9	Extrême	XII	Destruction quasi-totale, dégâts graves ou effondrement de tous les bâtiments. Modification du relief.

Table des contenus

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

1 Séismes

2 Théorie

- DSP

- Modélisation de la propagation des ondes sismiques

- Multilatération

- Magnitude sismique

3 Résultats

- Tests

4 Bibliographie

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

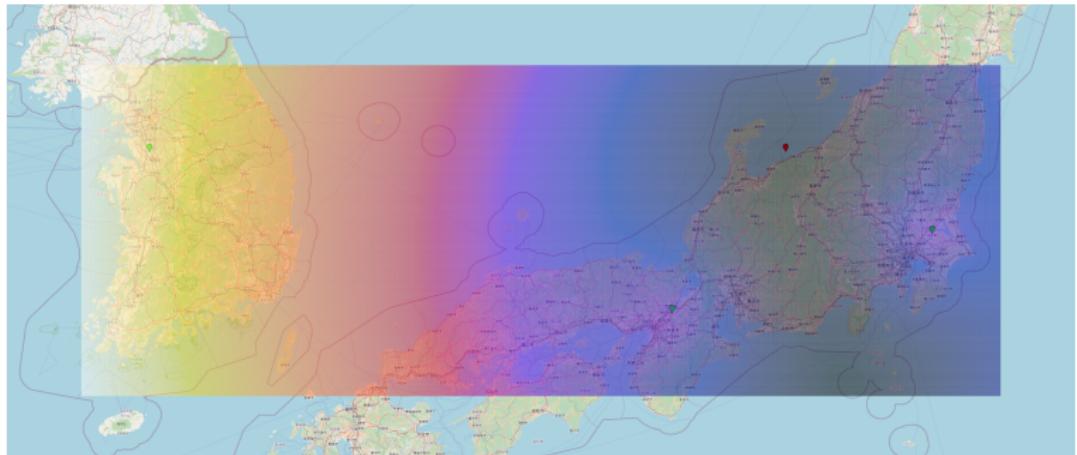


Figure – Mon estimation (avec les données RaspberryShake)

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

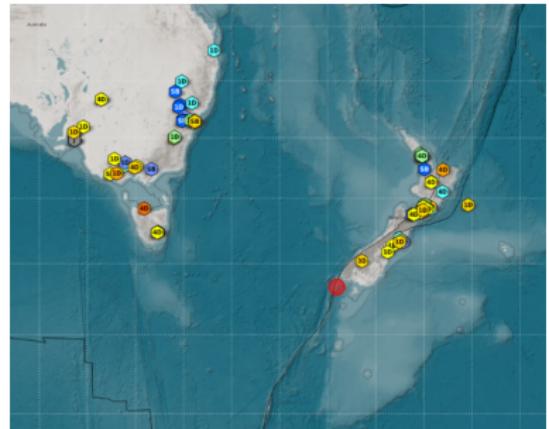
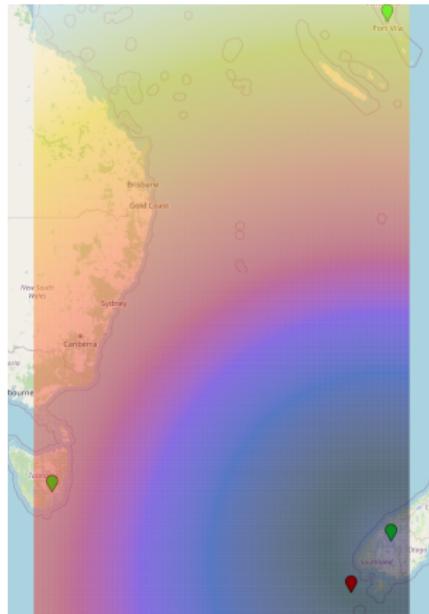


Figure – Estimation de l'USGS

Figure – Mon estimation (avec les
données RaspberryShake)

Table des contenus

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

1 Séismes

2 Théorie

- DSP

- Modélisation de la propagation des ondes sismiques

- Multilatération

- Magnitude sismique

3 Résultats

- Tests

4 Bibliographie

Bibliographie (1/2)

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

-  3Blue1Brown, *But what is a convolution ?*, YouTube video, 2022.
<https://www.youtube.com/watch?v=KuXjwB4LzSA>
-  Michael Pound, *The Fast Fourier Transform Algorithm*, YouTube video, 2023.
https://www.youtube.com/watch?v=toj_IoCQE-4
-  Charles Van Loan, *The FFT Via Matrix Factorizations*, Lecture notes, 2010.
<https://www.cs.cornell.edu/~bindel/class/cs5220-s10/slides/FFT.pdf>
-  R.J. Mitchell, *Earthquake Sources*, Lecture notes, Western Washington University.
https://www.geol.wwu.edu/rjmitch/L4_EQsources.pdf
-  University of Hawaii, *Compare, Contrast, and Connect : Seismic Waves and Determining Earth's Structure*.
<https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/ocean-floor/layers-earth/compare-contrast-connect-seismic-waves-and-determining-earth-s-structure>
-  Peter Bormann, *Global 1-D Earth models (IASP91 tables)*, GFZ German Research Centre for Geosciences.
https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_4031/component/file_4032/content

Bibliographie (2/2)

DSP et
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la
propagation des
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

-  Yacine Boussoufa, *Earthquake Data Centers*, GitHub repository.
<https://github.com/YacineBoussoufa/EarthquakeDataCenters>
-  University of Edinburgh, *CFCS Lecture 15 : Convolutions and Kernels*.
https://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/cfcs1/lectures/cfcs_l15.pdf
-  Penn State Eberly College of Science, *STAT 510 : Lesson 8.2 - Cross Correlation Functions and Lagged Regressions*, Online course material.
<https://online.stat.psu.edu/stat510/lesson/8/8.2>
-  Jason Cantarella, *Nelder-Mead Method*, Lecture notes.
<https://jasoncantarella.com/downloads/NelderMeadProof.pdf>
-  Tatsuhiko Hara, *Determination of Broadband Moment Magnitude*, IISEE/BRI.
https://iisee.kenken.go.jp/lna/download.php?f=2011082925678c01.pdf&n=T0-100-2007_Mwp-2-new.pdf&cid=T0-100-2007