

# 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

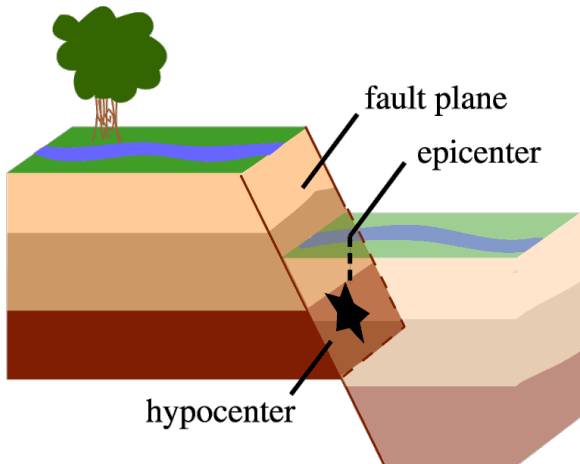
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



# Ondes P et S

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

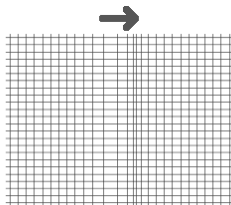
Multilatération

Magnitude sismique

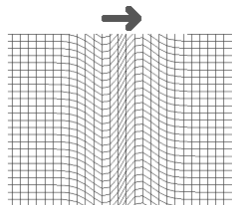
Résultats

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

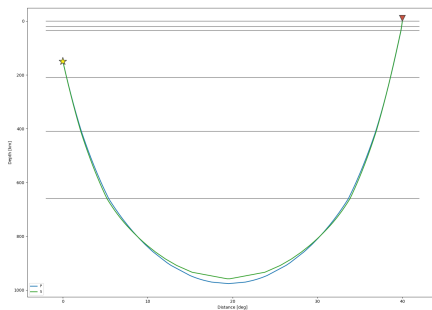


Figure – 6 km/s (ondes P) vs 4 km/s (ondes S)

# 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)	eeyore.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	cwbpublish.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

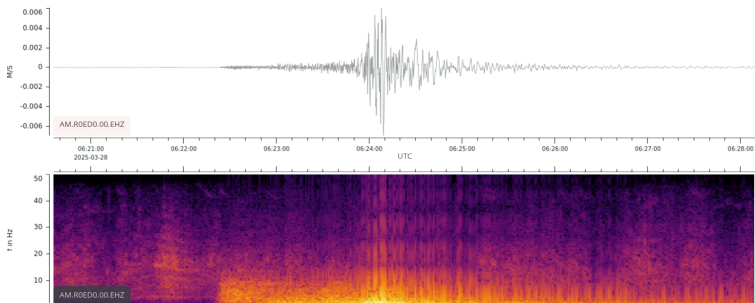


Figure – Exemple d'un enregistrement de sismographe

# Convolution

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

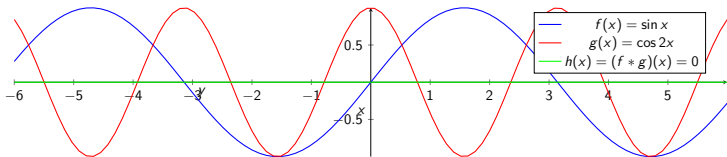
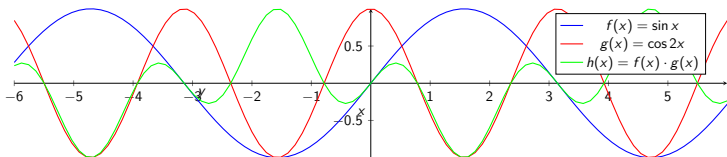
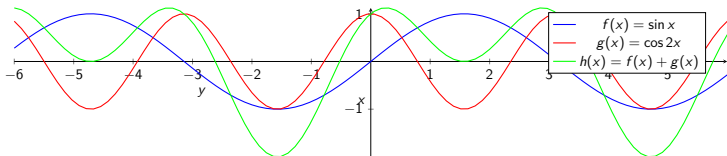
Multilatération

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

## ■ 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

## ■ 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

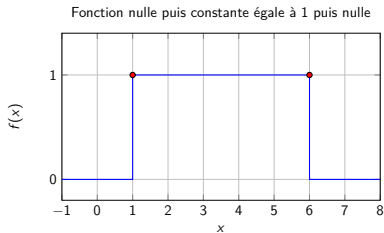
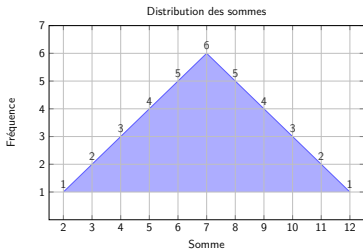
Multilatération

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

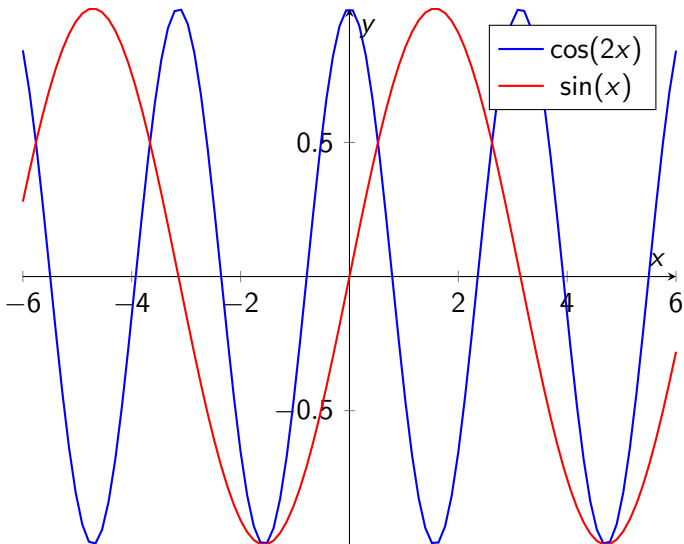
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



# Intuition sur la convolution

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

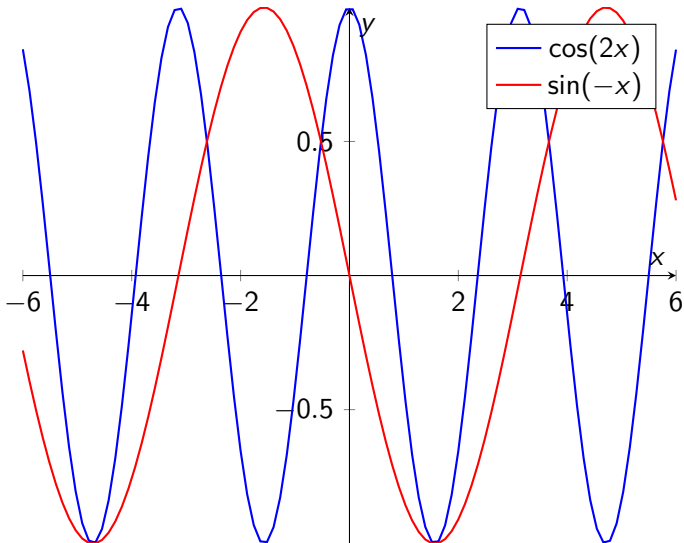
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



# Intuition sur la convolution

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

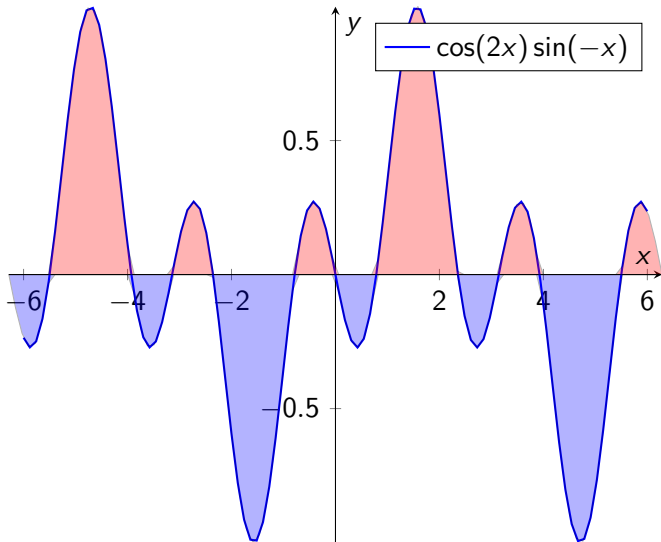
Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie



# Moyennage

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

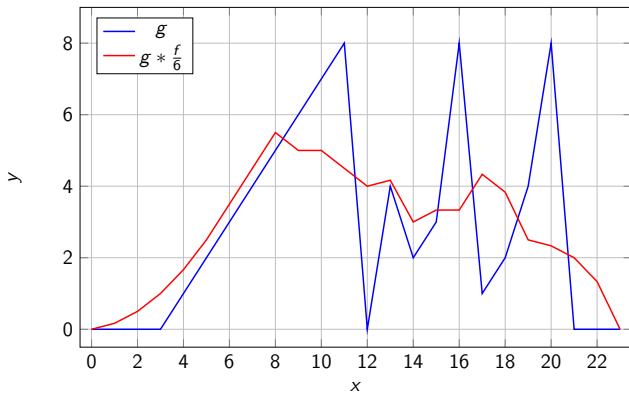
Magnitude sismique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R = F_{2^p} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} I_{2^{p-1}} & D_{2^{p-1}} \\ I_{2^{p-1}} & -D_{2^{p-1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{2^{p-1}} & 0 \\ 0 & F_{2^{p-1}} \end{pmatrix}$$

Coefficients d'indice pair

Coefficients d'indice impair

Récurrence

# 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 complexité de l'algorithme.

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

Complexité 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,  $\frac{u_{p+1}}{2^{p+1}} = A + \frac{u_p}{2^p}$

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

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

$$\text{Or } p = \log_2 n$$

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

# 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 :

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

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

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).

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

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

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie  
DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération  
Magnitude sismique

Résultats  
Tests

Bibliographie

# Passage du domaine temporel au domaine fréquentiel

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

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

# Corrélation croisée

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

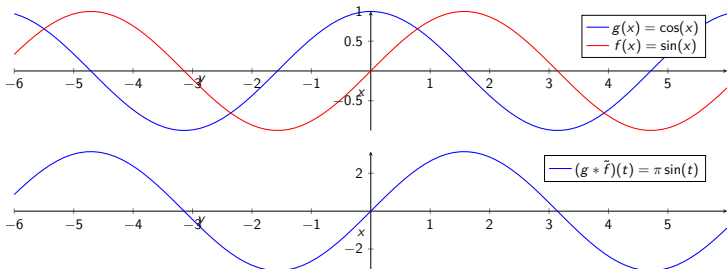
Résultats

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

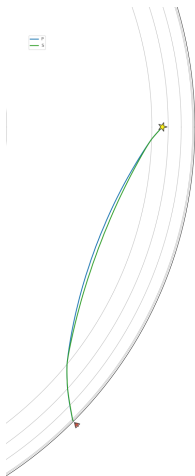
Multilatération

Magnitude sismique

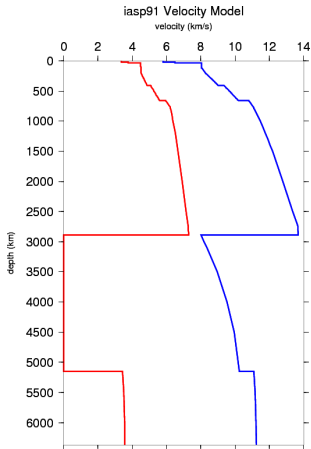
Résultats

Tests

Bibliographie



(a) TauPy



IRIS

— IASP91 ( $V_p$ , km/s), Kennett & Engdahl, 1991, at (40.0–120.0)  
— IASP91 ( $V_s$ , km/s), Kennett & Engdahl, 1991, at (40.0–120.0)  
[www.iris.edu/dms/products/ie.mc](http://www.iris.edu/dms/products/ie.mc)

(b)



# Tabulation et interpolation

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

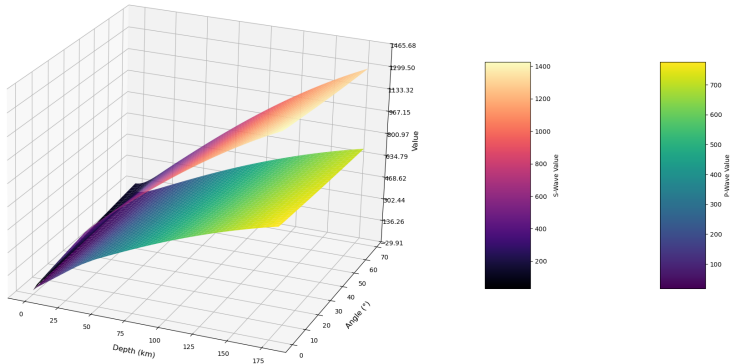


Figure – Visualization des deux tables précalculées

# Fonction d'erreur

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

Latitude et longitude estimée  
Date de début du séisme estimée

E( *depth* , *lat* , *lon* , *epoch* , *obs* ) =

↑ Profondeur estimée      ↑ Tableau des observations

Temps de propagation calculé par le modèle

Temps de propagation avec la date de début du séisme estimée

Calcul de l'angle entre le sismographe et la position estimée du séisme

$$\sum_i \left( \frac{(obs_i S - epoch) - S(depth, greatCircleAngle(lat, lon, lat_i, lon_i))}{obs_i S - epoch} \right)^2 +$$

Renormalisation

On fait la moyenne quadratique pour avoir l'écart

$$\left( \frac{(obs_i P - epoch) - P(depth, greatCircleAngle(lat, lon, lat_i, lon_i))}{obs_i P - epoch} \right)^2$$

Idem mais pour l'onde P

# 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

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

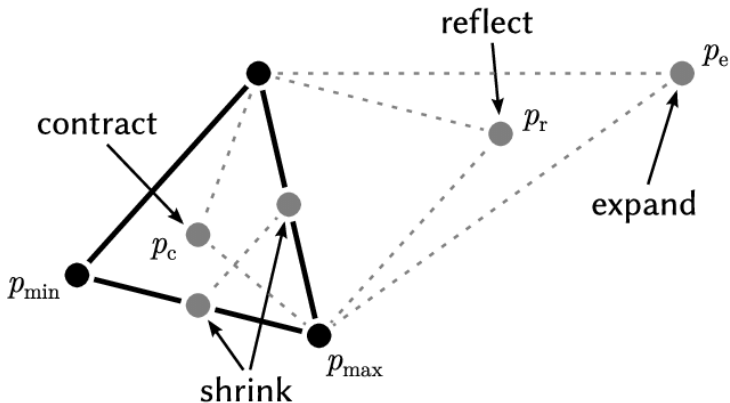


Figure – Une itération de Nelder-Mead sur un espace de dimension 2

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

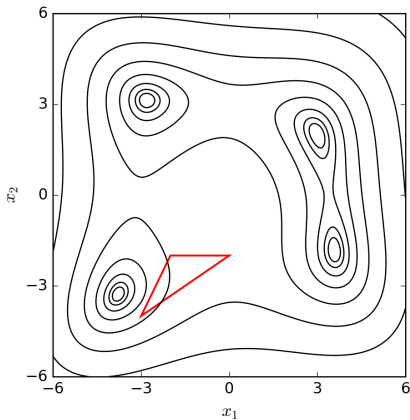


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

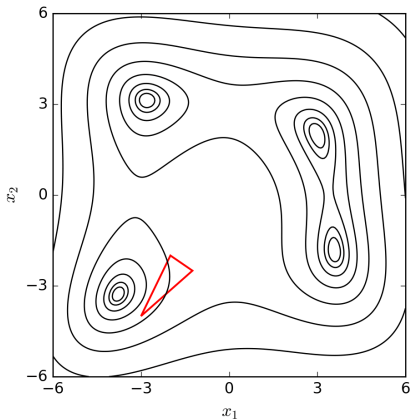


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

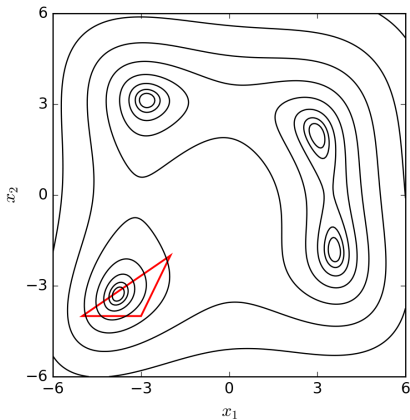


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

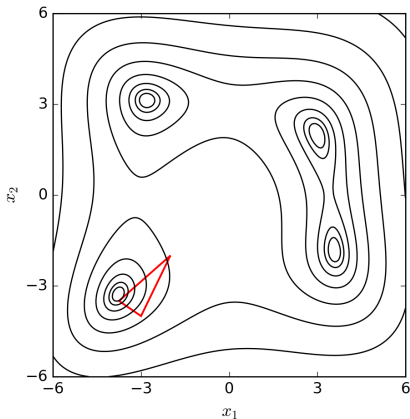


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau



# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

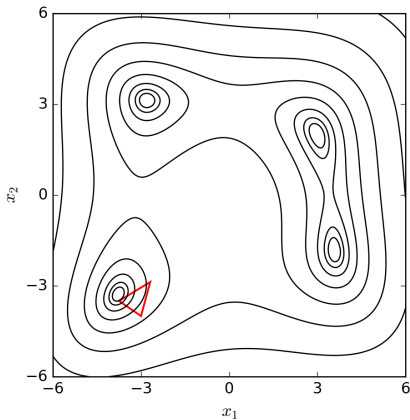


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

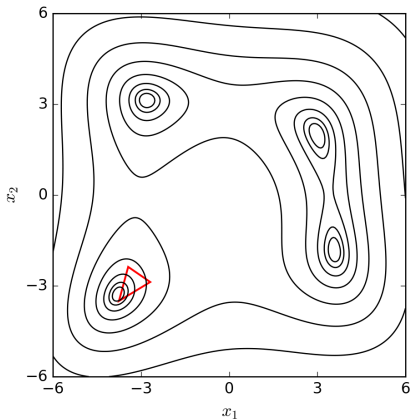


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

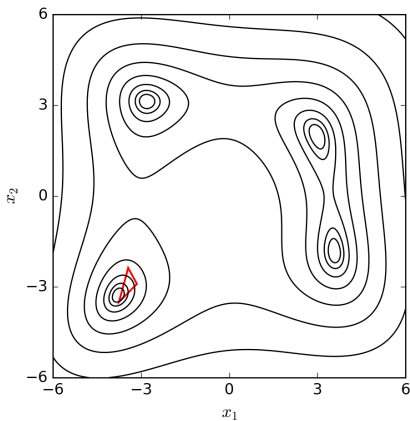


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

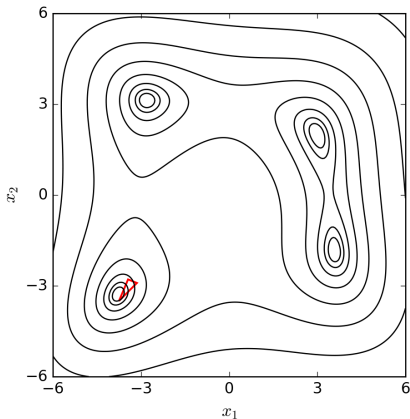


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

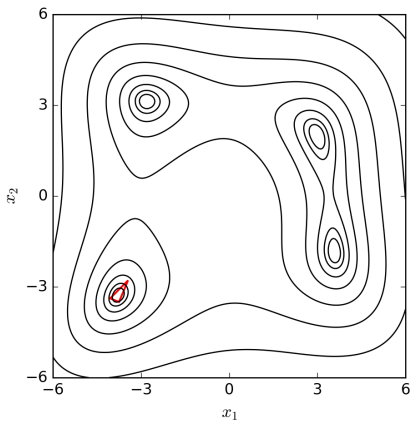


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

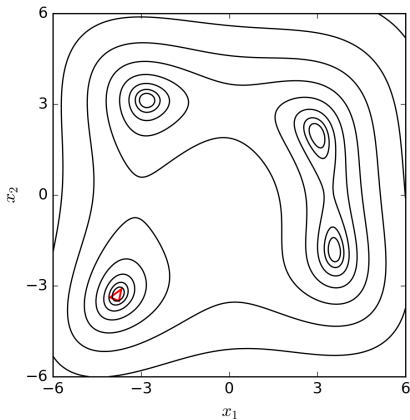


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

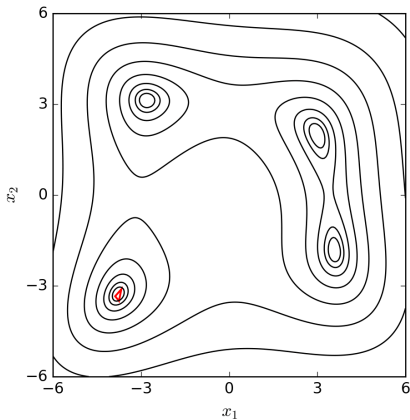


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

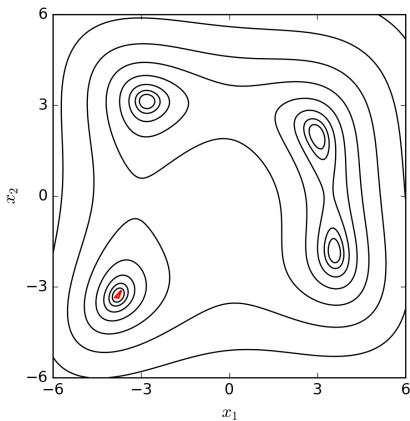


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau



# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

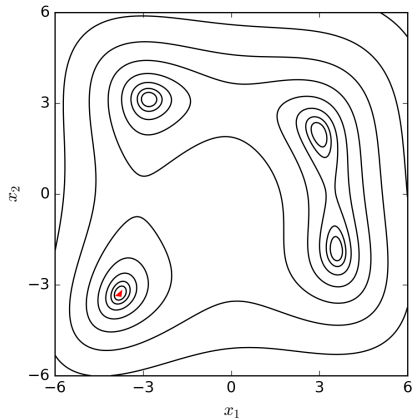


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

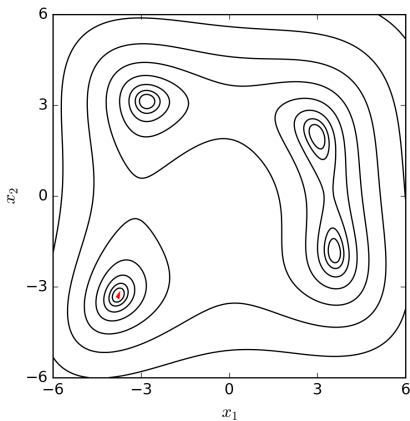


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

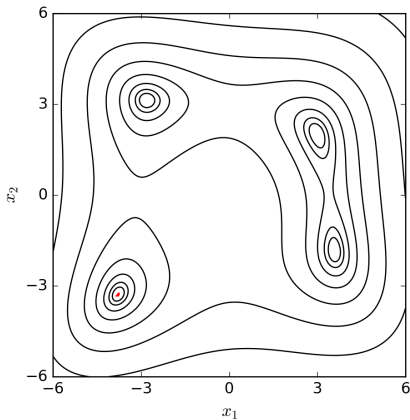


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

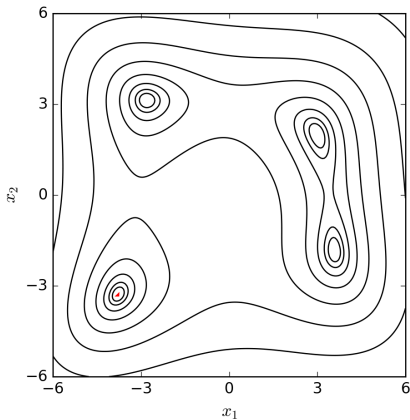


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

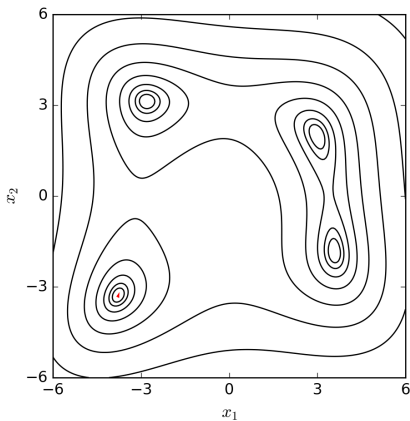


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

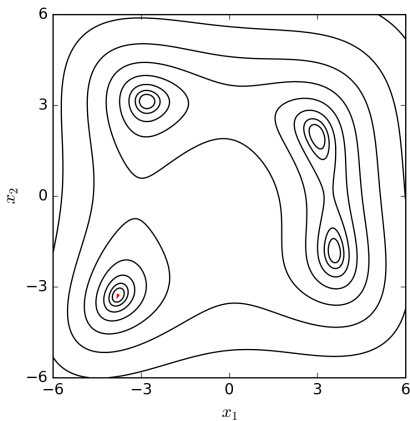


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

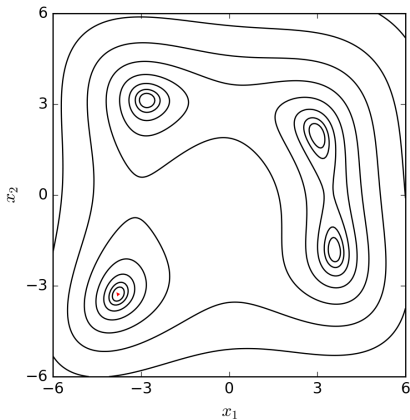


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau

# Méthode de Nelder-Mead

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

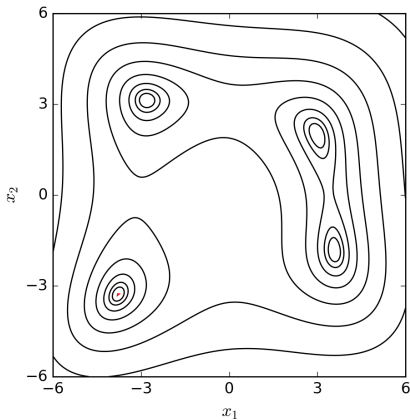


Figure – Nelder-Mead sur la fonction de Himmelblau



# Formule de calcul de magnitude sur l'échelle Richter

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

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

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 ( $\delta$ ) 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  $\Delta$  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 des 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

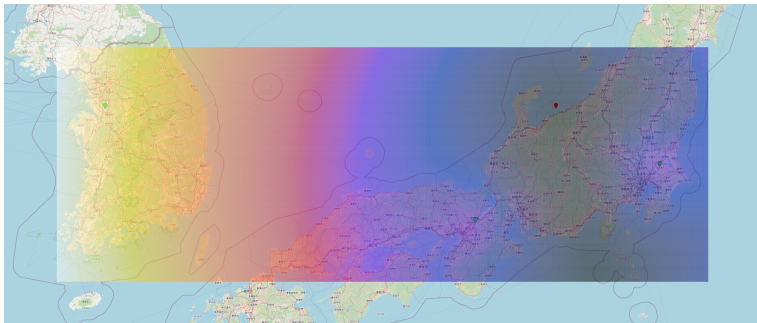


Figure – Mon estimation (avec les données RaspberryShake)

DSP et  
Sismologie

Dalibard

Séismes

Théorie

DSP

Modélisation de la  
propagation des  
ondes sismiques

Multilatération

Magnitude sismique

Résultats

Tests

Bibliographie

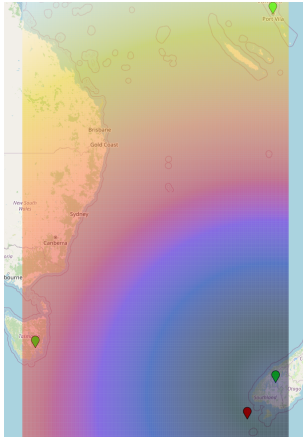


Figure – Mon estimation (avec les données RaspberryShake)

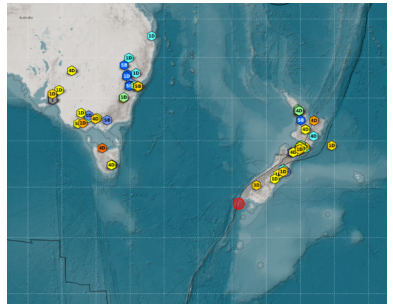


Figure – Estimation de l'USGS

# 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](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.wvu.edu/rjmitch/L4\\_EQsources.pdf](https://www.geol.wvu.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](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\\_115.pdf](https://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/cfcs1/lectures/cfcs_115.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*, IISSE/BRI.  
[https://iisee.kenken.go.jp/lna/download.php?f=2011082925678c01.pdf&n=T0-100-2007\\_Mwp-2-new.pdf&cid=T0-100-2007](https://iisee.kenken.go.jp/lna/download.php?f=2011082925678c01.pdf&n=T0-100-2007_Mwp-2-new.pdf&cid=T0-100-2007)