

Détection précoce des tsunamis: le système DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)

Objectif : permettre de détecter un
tsunami et d'estimer sa hauteur dans un
court délai

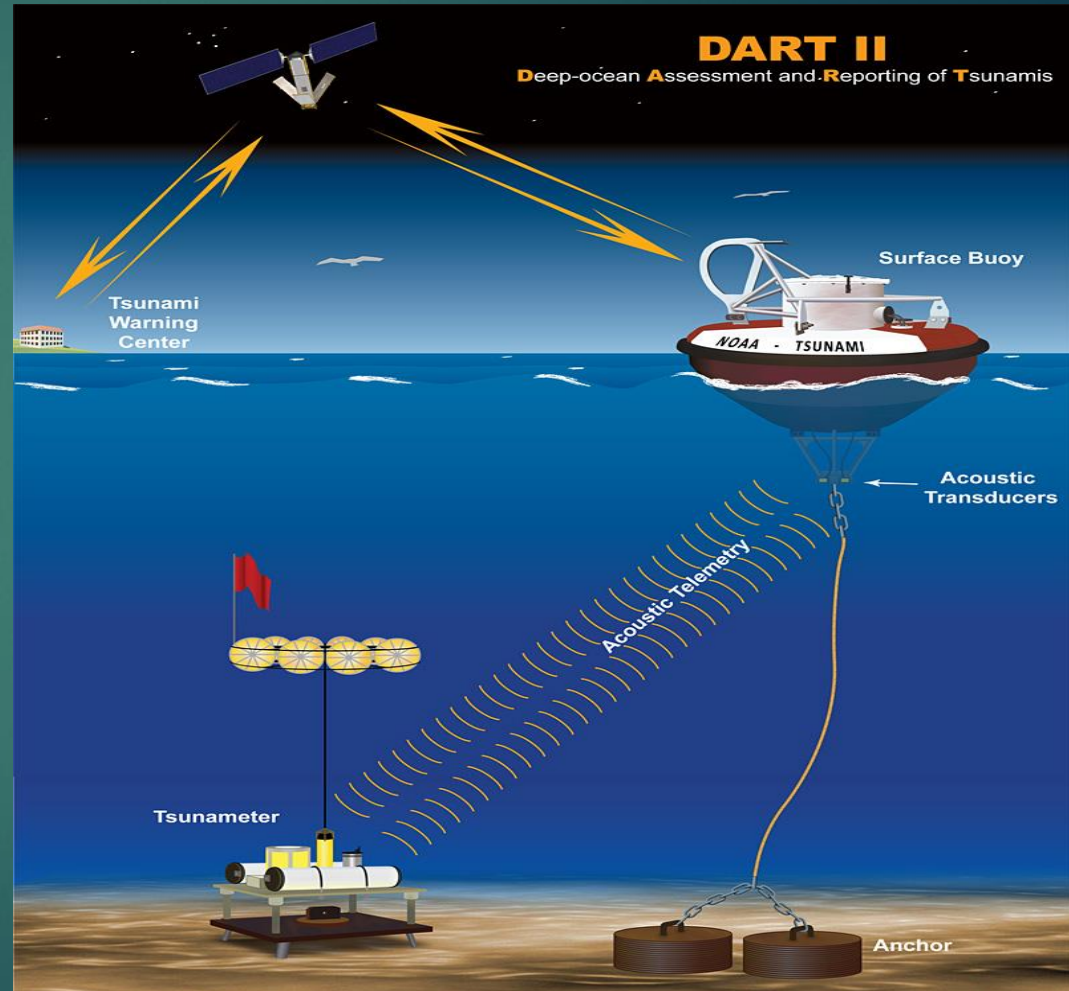
Numéro d'inscription:
23944

Thème 2020/2021: enjeux sociétaux
(environnement, sécurité, énergie)

Présentation

2

- Lors du passage d'une vague tsunami l'enregistreur de pression de fond (tsunamimètre) mesure une variation brusque de pression.
- Une onde acoustique contenant les données mesurées est envoyée vers la partie flottante du système (la bouée de surface).
- Celle-ci envoie une onde électromagnétique vers le centre de détection des tsunamis par le biais d'un satellite.
- Un algorithme de détection des tsunamis déclenche par la suite une alerte.

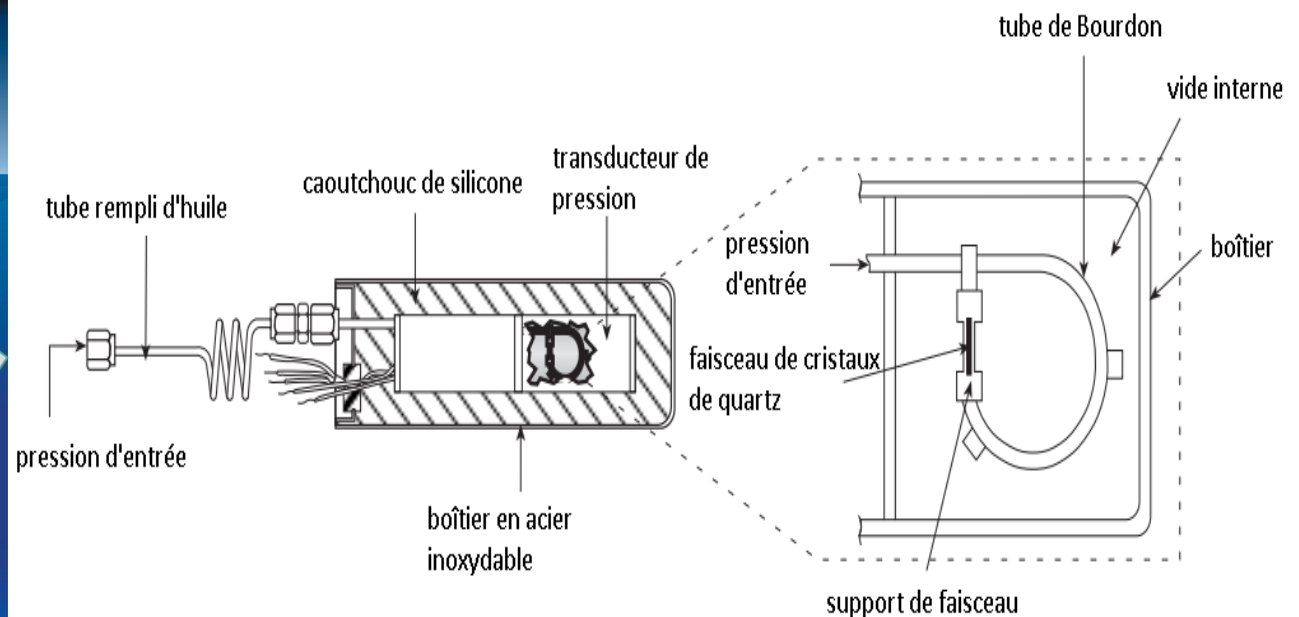
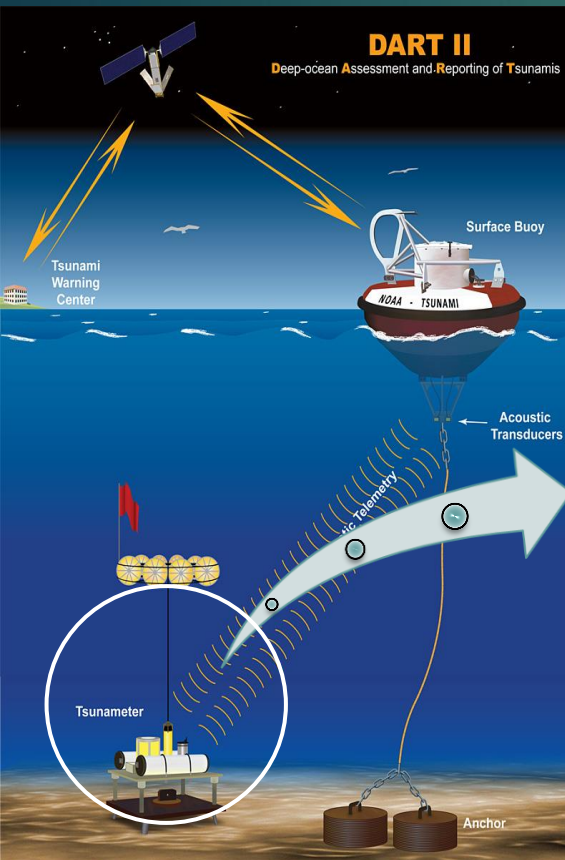


La source de l'image:
https://www.weather.gov/jetstream/dart_max

Plan

- I. Mesure de la pression dans le fond marin par le tsunamimètre
- II. Etude de l'onde acoustique qui se propage dans l'eau
- III. Etablissement de l'algorithme de détection du tsunami
- IV. Une extension du système DART
- V. Conclusion

I. Mesure de la pression dans le fond marin par le tsunamimètre



Modélisation du capteur de pression

- Le fonctionnement du capteur de pression repose sur la déformation des matériaux piézoélectriques (le quartz dans notre cas d'étude) qui génèrent de l'électricité, celle-ci étant proportionnelle à la contrainte appliquée .
- Afin de pouvoir mesurer la pression, **il est nécessaire d'étudier le couplage existant entre la force appliquée et la tension récupérée et inversement.**

Modélisation:

On considère un doublet de quartz comme un condensateur plan dans lequel on voit des charges lorsque des forces lui sont appliquées.



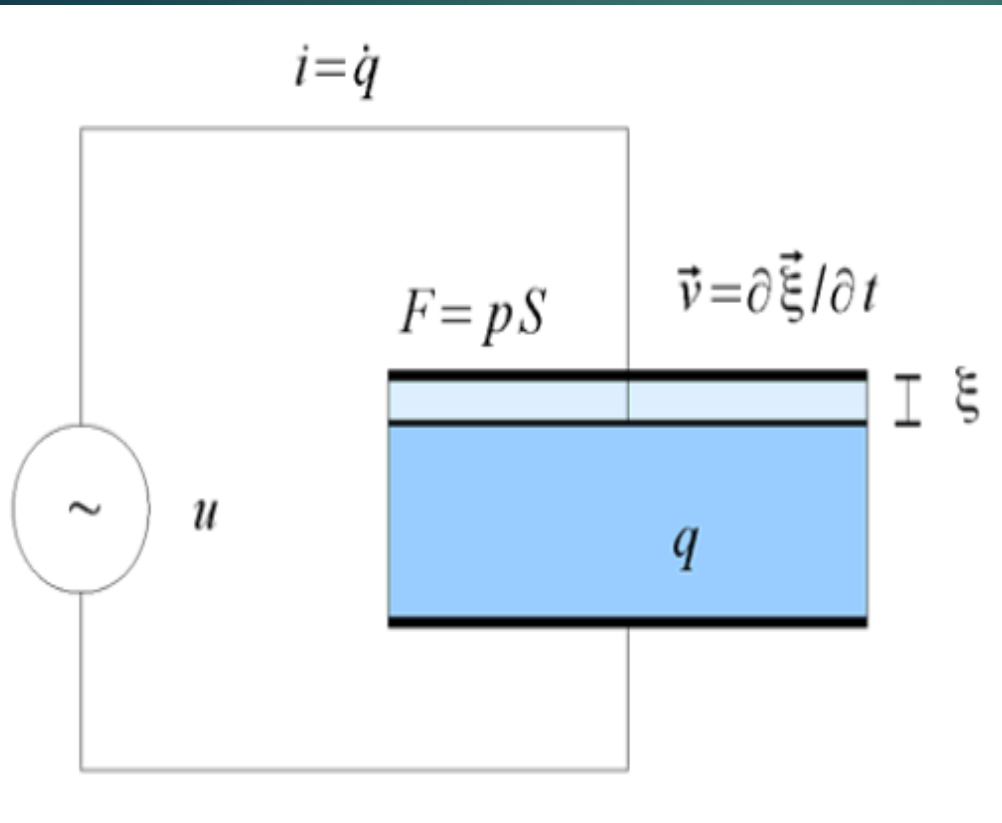
**Disposition des
quartz**

La source de l'image:
<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00233451/document>
(avec modification)

Hypothèses simplificatrices:

- Petites déformations appliquées sur le condensateur, qui permettent de linéariser les équations de couplage .
- L'armature du condensateur présente une épaisseur négligeable devant ses dimensions transversales. Ainsi on peut assimiler une face du matériau (lame) piézoélectrique comme une armature mobile d'un condensateur, dont l'autre extrémité est supposée immobile .
- L'élément piézoélectrique ne subit que des forces de traction-compression harmoniques (dans son épaisseur) de fréquence (f) entraînant un mouvement vibratoire transversal .

➤ On considère ainsi le montage suivant:



Avec:

ξ l'élongation de la face supérieure ;

v la vitesse vibratoire de la face supérieure ;

q la charge électrique de l'élément ;

i le courant électrique traversant l'élément ;

u la tension appliquée entre les armatures ;

$F = pS$ la force de traction appliquée à l'élément.

- La charge q due à la polarisation électrique provoquée par la déformation résultant de l'application de la force seule (lorsque le circuit est ouvert ou $u=0$), peut s'exprimer, dans l'hypothèse linéaire : $q = -\Gamma_p * F$

avec Γ_p : constante désignant le module piézoélectrique (en C/m) .

- L'application à l'élément de la tension seule (i.e. lorsque le bilame n'est pas soumis à une force extérieure) y crée un champ électrique, résultant en une contrainte, et par la suite une déformation de la face mobile selon :

$$\xi = \Gamma_p * u \text{ (ici } \Gamma_p \text{ est en m/V) .}$$

Etablissement des équations de mouvement

- Loi de Newton : en première approximation, le condensateur se comporte comme une souplesse mécanique dans le domaine fréquentiel de fonctionnement du transducteur (i.e. en dessous de la fréquence de résonance de la plaque). Lorsque le bilame n'est soumis qu'à la force F (en supposant le circuit ouvert), le bilame opposera une force de rappel de telle manière que :

$\xi = -C_m * F$ (avec $u=0$ et C_m une constante) (par analogie avec un ressort soumis à une force).

- Loi des mailles : Si le transducteur piézoélectrique, assimilé en première approximation à un condensateur de capacité C_0 , est connecté à une source, on a la loi suivante : $q = C_0 * u$ (avec $F=0$)

Equations de couplage piézoélectrique

On va procéder par superposition:

- Si l'élément est soumis simultanément à une tension u et à une force F , la déformation résultante est la combinaison de la déformation à force F nulle et la déformation à tension u nulle : $\xi = \Gamma_p * u - C_m * F$
- Réciproquement, la charge q de la lame résulte de la combinaison de la conversion piézoélectrique à tension u nulle, et de l'application de la tension u seule à travers la capacité C_0 : $q = -\Gamma_p * F + C_0 * u$

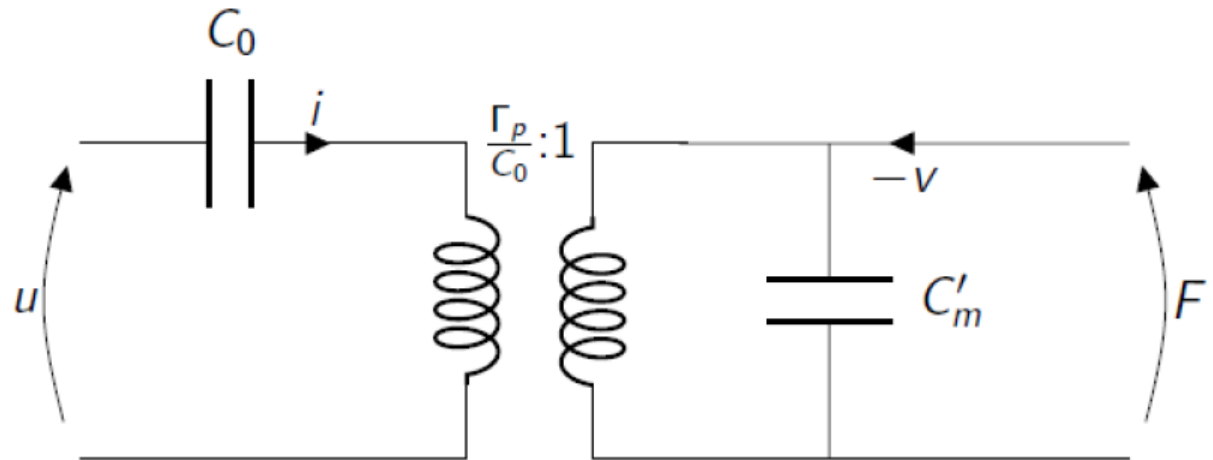
- Vu qu'on étudie des oscillations harmoniques on peut donc adopter la notation complexe pour avoir:

$$u = \frac{1}{j\omega C_0} i + \frac{\Gamma_p}{C_0} F$$

$$F = \frac{1}{C'_m} (-v + \frac{\Gamma_p}{C_0} i)$$

Avec: $C'_m = j\omega C_m (1 - \frac{\Gamma_p^2}{C_0 C_m})$

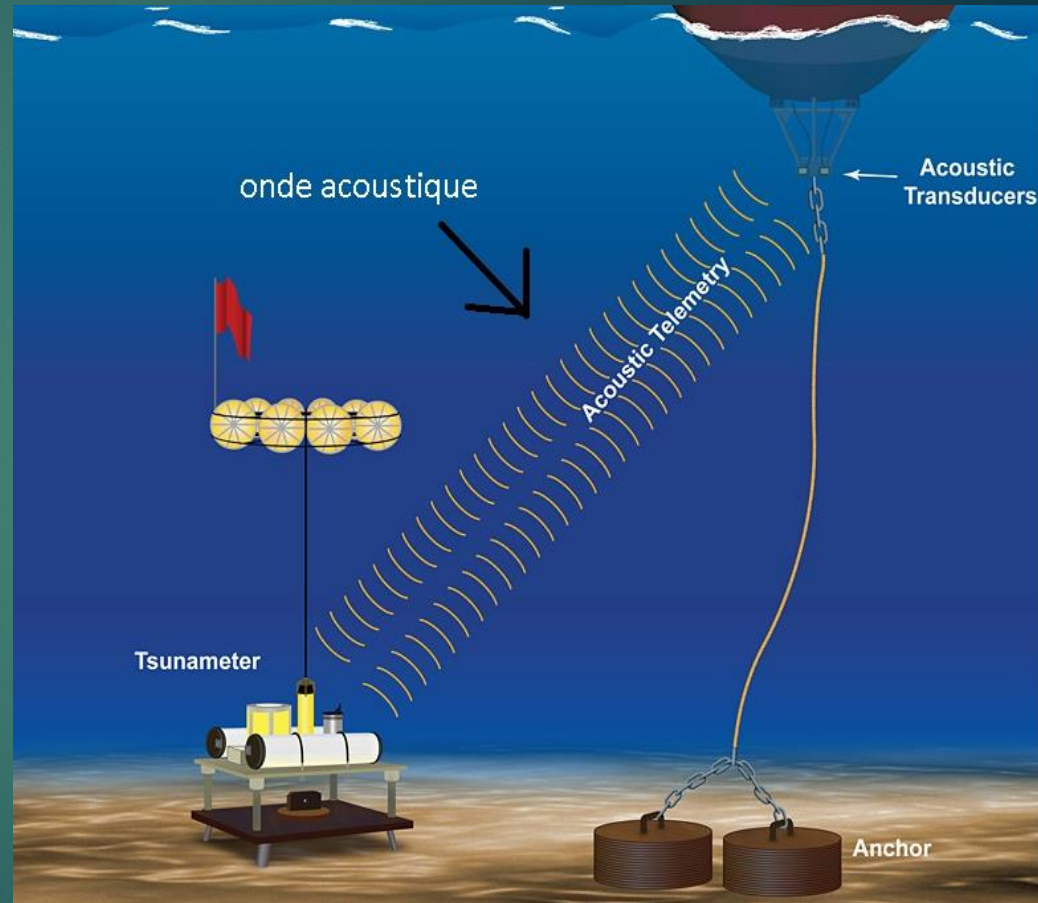
Ce couplage peut-être schématisé comme suit:



La source de l'image:

http://electroacoustique.univ-lemans.fr/cours/pdf/grain_34.pdf

Une fois la pression dans le fond marin est mesurée grâce au couplage piézoélectrique il est question maintenant d'envoyer ces données vers la bouée flottante en utilisant la télémétrie acoustique .



La source de l'image:

https://www.weather.gov/jetstream/dart_max
(avec modification)

II. Etude de l'onde acoustique qui se propage dans l'eau

1. Etablissement de l'équation de propagation

Par analogie avec l'équation locale de la conservation de la charge ($\text{div}(\vec{J}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) on écrit l'équation locale de la conservation de la masse :

$$\text{div}(\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Avec ρ : masse volumique de l'eau

L'équation de mouvement donne :

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}} P$$

- En combinant ces deux équations on aboutit à l'équation de la propagation:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \Delta P = 0$$

Où c est la vitesse du son dans l'eau: $c \approx 1482$ m/s

En considérant que la profondeur du milieu marin est environ 6000m, la durée nécessaire pour que l'onde atteigne la bouée de surface serait environ égale à **4 secondes**.

Commentaire: ce délai est acceptable pour la transmission de l'information vers la bouée flottante.

2. Résolution numérique et simulation

- Vu que l'onde se propage verticalement entre le tsunamimètre et la bouée flottante, on se place dans le cadre d'une dimension(1D) , on obtient ainsi:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (*)$$

Avec (O,z) l'axe ascendant.

La méthode des différences finies

- On applique le schéma centré d'Euler explicite pour obtenir:

$$P^{n+1}_j = 2P^n_j - P^{n-1}_j + \alpha^2(P^n_{j+1} - 2P^n_j + P^n_{j-1})$$

Avec $\alpha = c \frac{\text{le pas temporel}}{\text{le pas spatial}}$

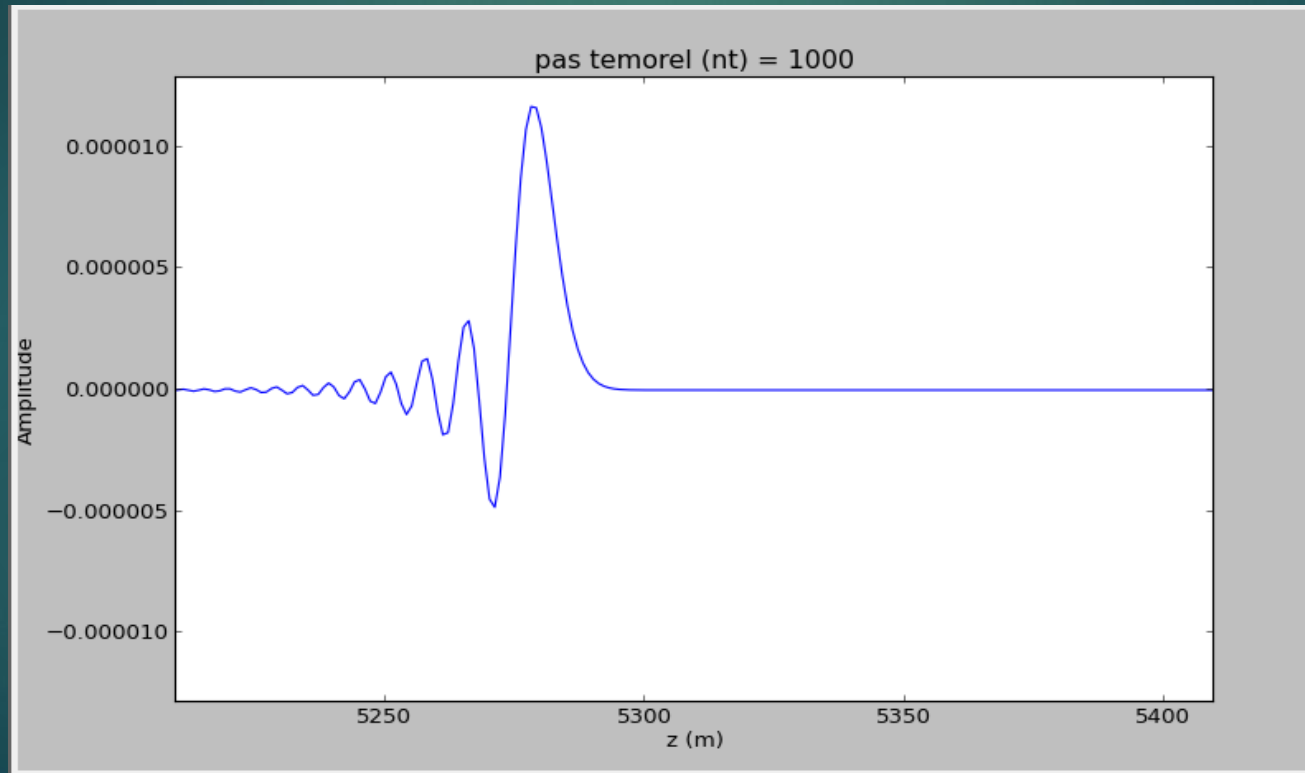
Sous la forme matricielle on obtient:

$$P^{n+1} = \alpha^2 * A * P^n + 2 * P^n - P^{n-1}$$

Avec : A la matrice tridiagonale de coefficients 1,-2,1

Graphe montrant la résolution numérique de l'équation (*):

Une fois le code python implémenté, on aboutit aux graphe suivant:



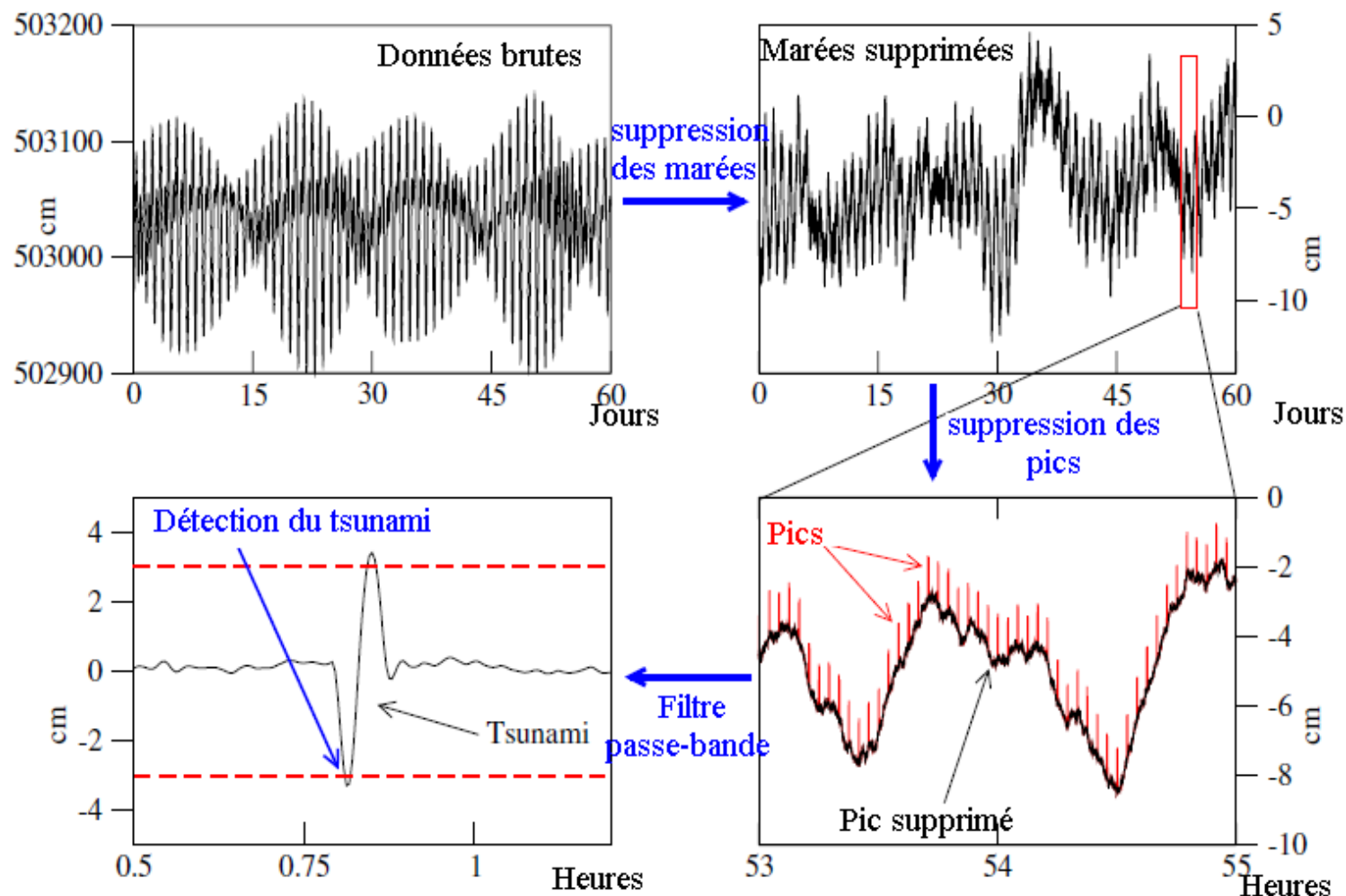
III. Etablissement de l'algorithme de détection du tsunami

18

- Chaque tsunamimètre DART est conçu pour détecter et signaler les tsunamis de manière autonome .
- L'algorithme de détection des tsunamis fonctionne en estimant tout d'abord l'amplitude de pression du tsunami, puis en comparant ces amplitudes à une valeur seuil .
- Les amplitudes sont calculées en soustrayant les pressions prédites des observations, où les prédictions correspondent étroitement aux marées:
 1. Pression ajoutée par le tsunami = pressions observées – pressions prédites
 2. Amplitude du tsunami = conversion de la pression ajoutée par le tsunami en amplitude
- Si les amplitudes dépassent le seuil, le tsunamimètre passe en mode événement pour fournir des informations détaillées sur le tsunami.

Suite de l'algorithme

- Une fois les mesures d'amplitudes acquises, celles-ci seront filtrées pour aboutir à une courbe simplifiée permettant la détection du tsunami comme suit:
- 3. Filtre permettant la suppression des marées
- 4. Filtre permettant la suppression des pics
- 5. Filtre passe-bande permettant la détection du tsunami
- 6. Comparaison à une valeur seuil
- 7. Déclenchement d'alerte si nécessaire



Le schéma algorithmique de détection des tsunamis en temps réel.

La source de l'image:

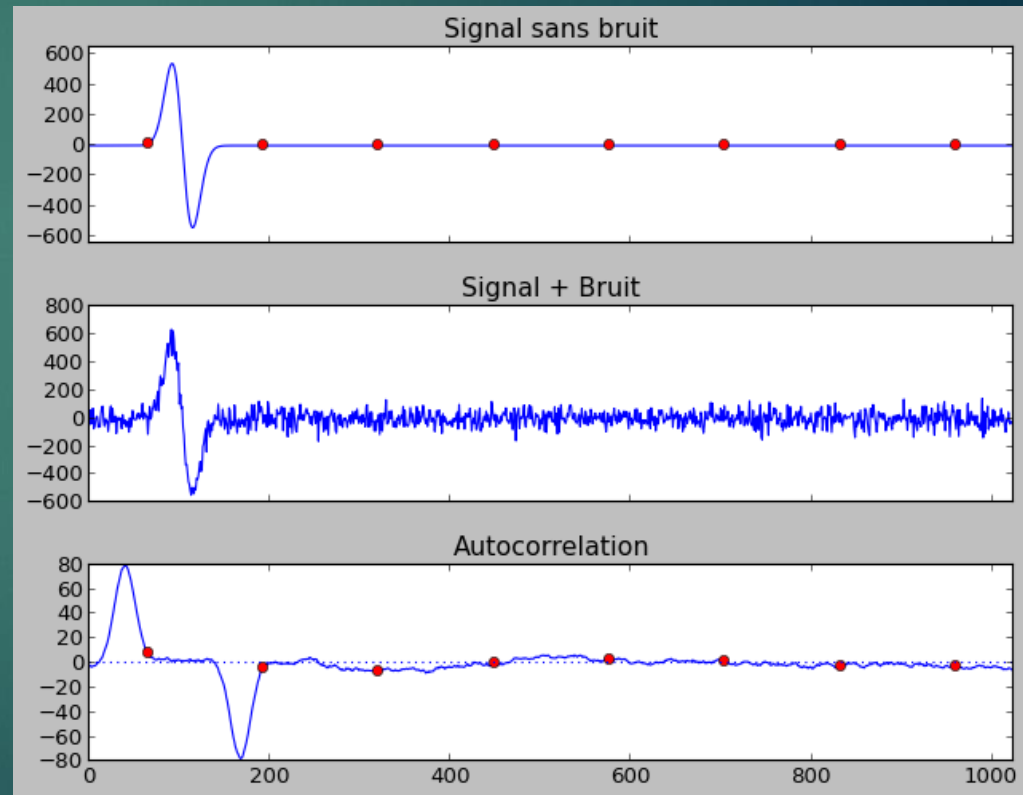
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JC012170>
(avec modification)

Simulation du signal avec et sans filtrage du bruit:

21

En utilisant le langage Python on considère une dérivée d'une gaussienne qui représente le signal sans bruit (1^{ère} figure), puis on lui superpose un signal bruit (2^{ème} figure).

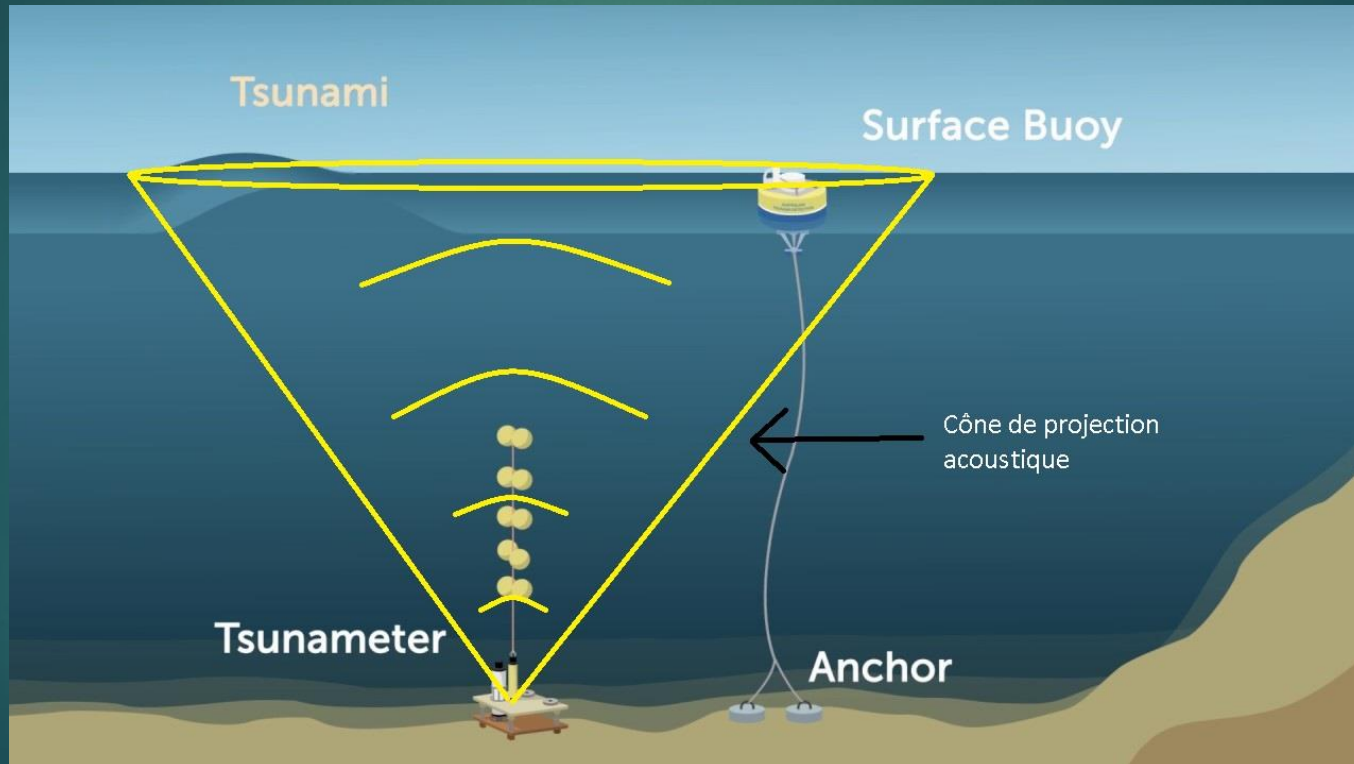
On lui applique enfin une autocorrélation pour aboutir à la figure 3 .



IV. Une extension du système DART

22

- **Problème naturel:** les vents et les vagues peuvent éloigner la bouée de surface hors du cône de projection acoustique du tsunamimètre, c'est-à-dire l'onde acoustique ne peut plus parvenir à la bouée de surface .



La source de l'image: http://www.bom.gov.au/tsunami/about/detection_buoys.shtml
(avec modification)

L'ajout d'un capteur d'inclinaison

Le modèle DART est équipé d'un capteur d'inclinaison monté à la base de l'un des boîtiers.

Il sert à déterminer l'orientation du transducteur acoustique lorsque le système s'est installé sur le fond marin.

Si l'inclinaison est supérieure à 10 degrés, le tsunamimètre peut être récupéré et redéployé.

Le cercle de veille de la bouée de surface pourrait la faire sortir du cône de projection acoustique du tsunamimètre si l'angle par rapport à la verticale est trop important.

V. Conclusion

24

Le système DART permet:

- D'estimer la hauteur des vagues tsunami avec une précision de l'ordre du millimètre.
- De fournir des informations sur un tsunami en temps réel chaque 15 secondes.
- D'éviter la provocation des fausses alertes, grâce à l'algorithme qui prend en compte les prédictions causées par les phénomènes naturels.

Amélioration possible:

- L'ajout d'un sismomètre dans le paquet de fond permet de détecter les séismes sous-marins et offre ainsi une meilleure estimation de la nature du tsunami engendré par les séismes.

Merci pour votre attention

Annexe

Code du signal avec et sans bruit, et autocorrélation

```

from scipy import signal
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# On définit l'amplitude de l'onde
A= 10.
# On définit pi
pi = np.pi
# On définit la fréquence
f = 20.
# On calcule la pulsation
w = 2*pi*f
# On définit la célérité de la propagation dans le milieu à 1
c=0.5
# On définit la distance caractéristique d'atténuation
d = 5.
# Discrétisation de l'intervalle spatial
x=np.linspace(0,10,1024)
A= 100.
w=62.8

# t = np.arange(0,10,0.05)
t = 2.

pure = A*np.exp(-(t-x/c)**2)*10*((20/c)*(t-x/c))
noise = 50*np.random.normal(0, 1, x.shape)
signal_noise = pure + noise

# Ici on utilise la fonction correlate du sous module signal
# du module scipy pour calculer l'auto-corrélation

corr = signal.correlate(signal_noise, np.ones(128), mode='same') / 128

clock = np.arange(64, len(signal_noise), 128)
fig, (ax_orig, ax_noise, ax_corr) = plt.subplots(3, 1, sharex=True)
ax_orig.plot(pure)
ax_orig.plot(clock, pure[clock], 'ro')
ax_orig.set_title('Signal sans bruit')
ax_noise.plot(signal_noise)
ax_noise.set_title('Signal + Bruit')
ax_corr.plot(corr)
ax_corr.plot(clock, corr[clock], 'ro')
ax_corr.axhline(0.5, ls=':')
ax_corr.set_title('Autocorrelation')
ax_orig.margins(0, 0.1)
fig.tight_layout()
fig.show()

plt.show()

```

Code de résolution de l'équation (*)

27

```
import numpy as np
import matplotlib

matplotlib.use("nbagg")
import matplotlib.pyplot as plt

from matplotlib import gridspec

import warnings
warnings.filterwarnings("ignore")

nx = 10000      # nombre de points de grille dans la direction x
xmax = 10000    # domaine physique (m)
dx = xmax/(nx-1) # le pas spatial
c0 = 1482.      # célérité de l'onde (m/s)
isrc = int(nx/2)
#ir = isrc + 100
nt = 1001      # nombre maximal de pas de temps
dt = 0.0010    # pas temporel

# Source time function parameters
f0 = 25. # fréquence dominante de la source (Hz)
t0 = 4. / f0 # décalage horaire de la source
# Snapshot
idispl = 5

src = np.zeros(nt + 1)
time = np.linspace(0 * dt, nt * dt, nt)
# 1ere dérivée d'une Gaussienne
src = -8. * (time - t0) * f0 * (np.exp(-1.0 * (4*f0) ** 2 * (time - t0) ** 2))

p = np.zeros(nx)
pold = np.zeros(nx)
pnew = np.zeros(nx)
d2px = np.zeros(nx)

c = np.zeros(nx)
c = c + c0

x = np.arange(nx)
x = x * dx

plt.ion()
fig2 = plt.figure(figsize=(10, 6))
gs2 = gridspec.GridSpec(1,1,width_ratios=[1],hspace=0.3, wspace=0.3)

ax3 = plt.subplot(gs2[0])
leg1,= ax3.plot(isrc, 0, 'r*', markersize=11)

up31,= ax3.plot(p)
ax3.set_xlim(0, xmax)
ax3.set_ylim(-np.max(p), np.max(p))
ax3.set_title('pas temporel (nt) = 0')
ax3.set_xlabel('z (m)')
ax3.set_ylabel('Amplitude')

plt.show()
```

Suite du code de résolution de l'équation (*)

```

up31,= ax3.plot(p)
ax3.set_xlim(0, xmax)
ax3.set_ylim(-np.max(p), np.max(p))
ax3.set_title('pas temporel (nt) = 0')
ax3.set_xlabel('z (m)')
ax3.set_ylabel('Amplitude')

plt.show()

for it in range(nt):

    for i in range(1, nx - 1):
        d2px[i] = (p[i + 1] - 2 * p[i] + p[i - 1]) / dx ** 2

    pnew = 2 * p - pold + c ** 2 * dt ** 2 * d2px

    pnew[isrc] = pnew[isrc] + src[it] / (dx) * dt ** 2

    pold, p = p, pnew

    if (it % idisp) == 0:
        ax3.set_title('pas temporel (nt) = %d' % it)
        ax3.set_ylim(-1.1*np.max(abs(p)), 1.1*np.max(abs(p)))
        window=100;xshift=25
        ax3.set_xlim(isrc*dx+c0*it*dt-window*dx-xshift, isrc*dx+c0*it*dt+window*dx-xshift)
        up31.set_ydata(p)
        plt.gcf().canvas.draw()

```