

Le chant de la Terre : écouter et modéliser les volcans



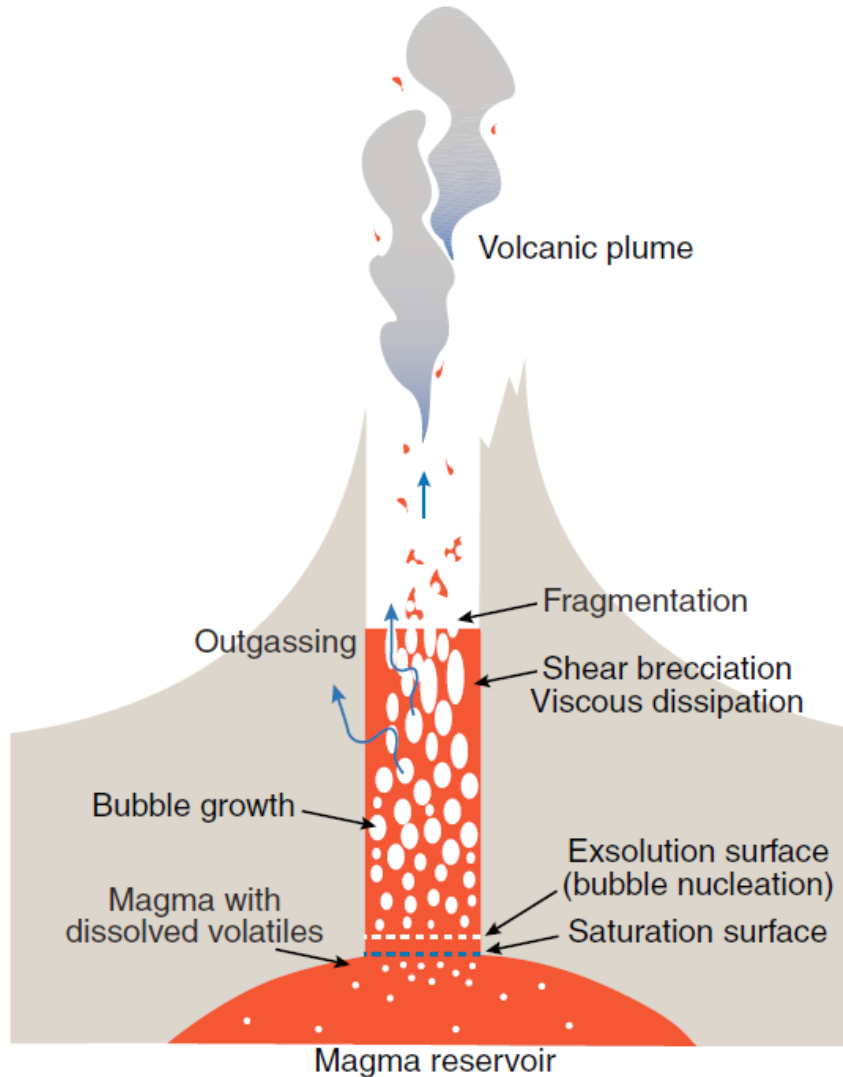
Valérie Vidal

Laboratoire de Physique,
ENS de Lyon - CNRS

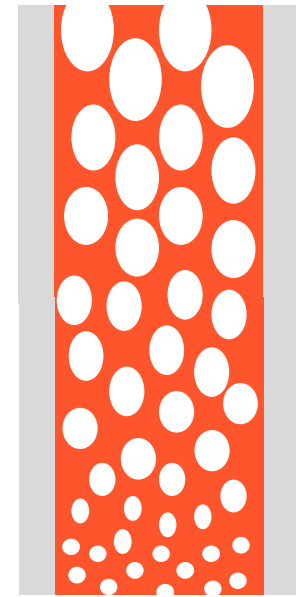
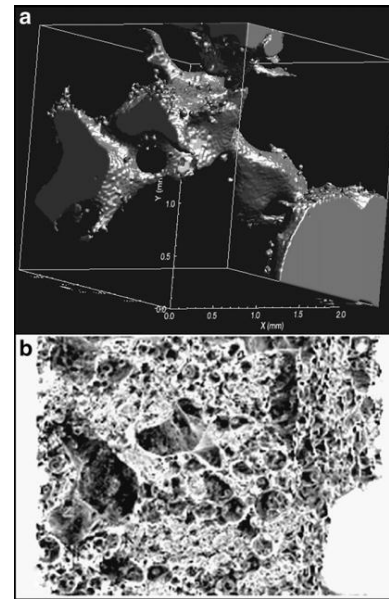


Formaterre 2012 – Institut Français de
l'Éducation, Lyon (France), 23/11/2012

A l'intérieur d'un volcan...



Mécanique du solide, mécanique des fluides, matière complexe, etc...



➤ percolation / fracture (solide)

[Burton et al., 2007]

➤ remontée de bulles (fluide)

[Gonnermann & Manga, 2007]

Une dynamique complexe

Bulles, fontaines de lave...



Piton de la Fournaise (Réunion)



Kilauea (Hawai'i)

... dégazage “passif”...

... ou intermittence !

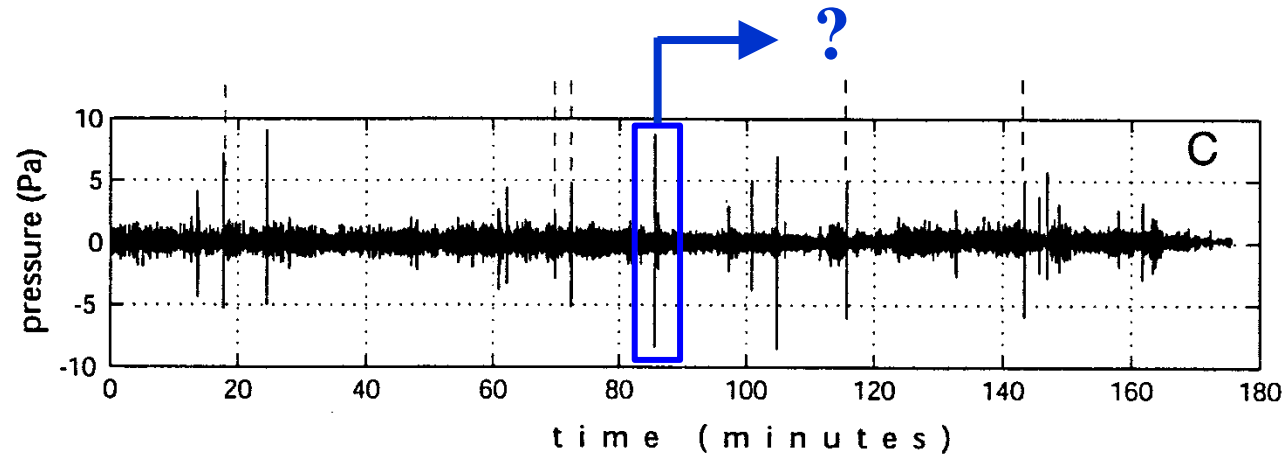
“Ecouter et modéliser les volcans”

... à partir de l'étude des signaux acoustiques

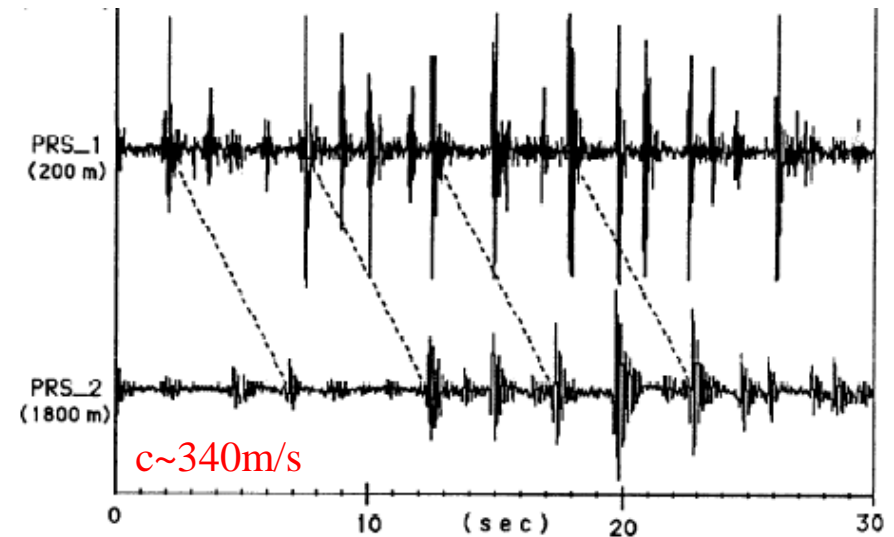
- Ce que l'on sait (sur les volcans)
- Les questions à résoudre... ?
- Ce que l'on sait (sur la physique)
- Quelques expériences simples (et pédagogiques) pour expliquer certains des phénomènes observés

Etude des signaux acoustiques

Eruptions répétitives
et « puffings »
(Stromboli)



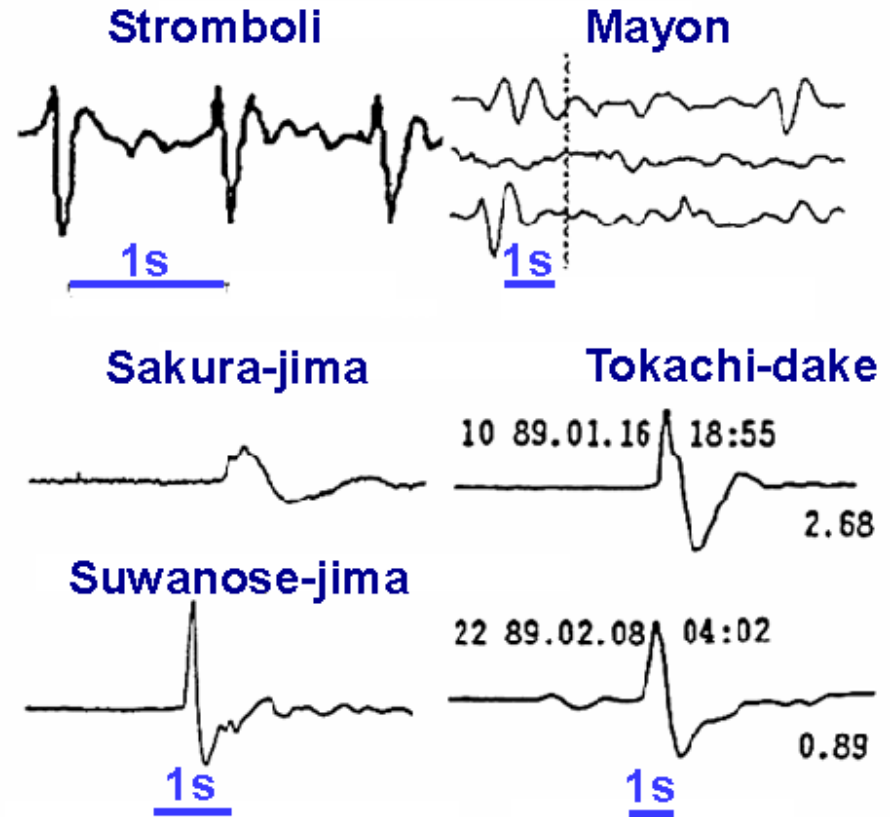
[Ripepe et al., 1996]



[Ripepe et al., 1996]

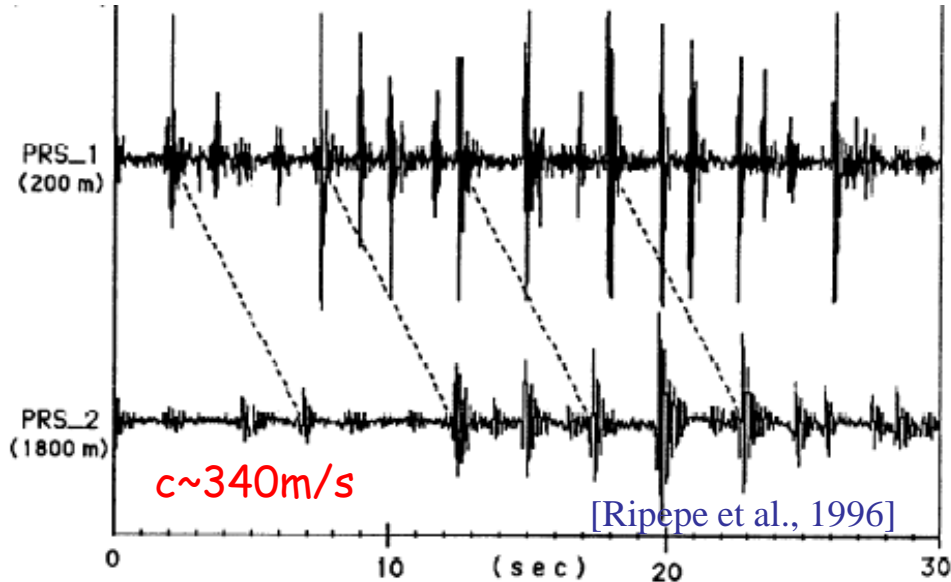
Forme d'onde acoustique

Une forme d'onde acoustique
similaire sur de nombreux
volcans



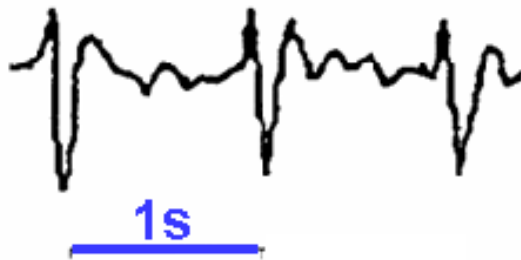
[Taniguchi et al., 1999]

Questions : l'exemple du Stromboli



(1) Signal acoustique
répétitif

(2) Forme d'onde répétitive

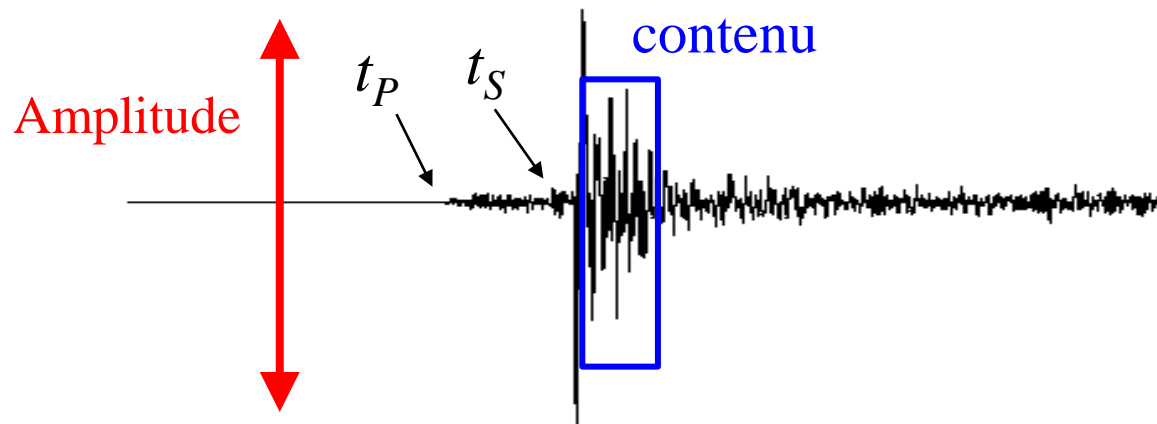


[Taniguchi et al., 1999]

- Qu'est-ce qui contrôle la périodicité et la similarité des explosions ?
- Comment expliquer la forme d'onde acoustique ?

L'exemple de la sismologie

- Que peut-on extraire comme information d'un signal ?



micro-événement
(tremblement de
terre), Bohême
(Allemagne)

[courtesy F. Scherbaum, 2005]

- amplitude de l'évènement
- localisation (temps d'arrivée)
- information sur le milieu de propagation

*bien connu en
sismologie !*

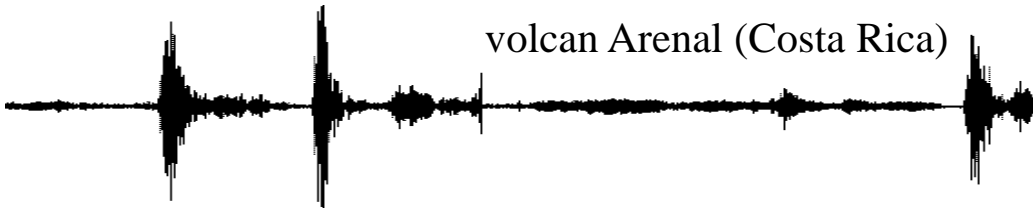
- Un bon sismologue reconnaît la nature d'un signal d'un coup d'oeil !

Qui est qui ?...

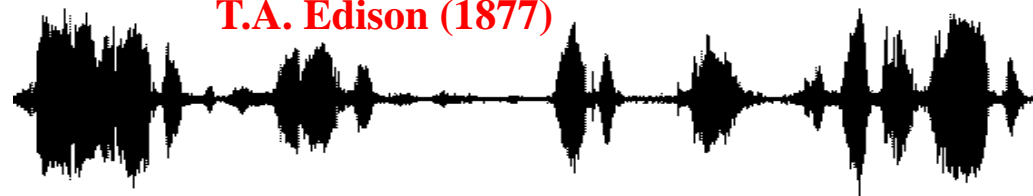
volcan Arenal (Costa Rica)



volcan Arenal (Costa Rica)



T.A. Edison (1877)



volcan Arenal (Costa Rica)

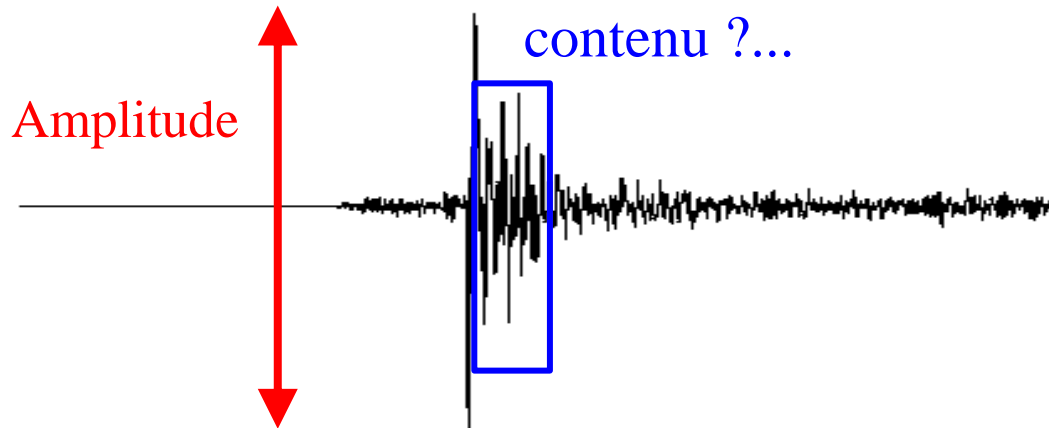


volcan Merapi (Indonésie)

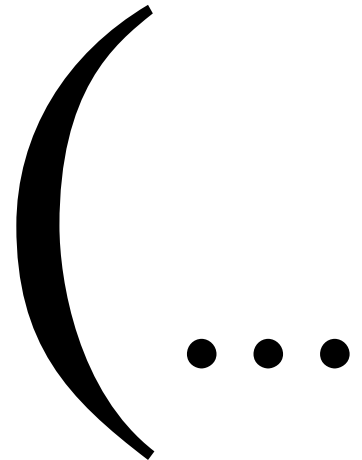


Traitement du signal

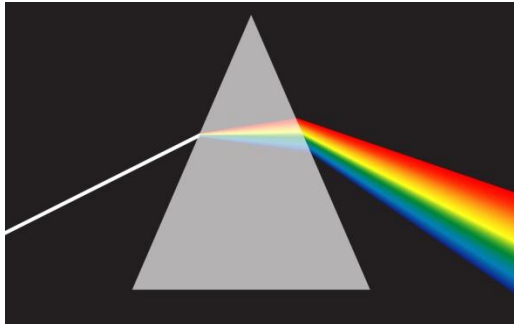
- Que peut-on extraire comme information d'un signal ?



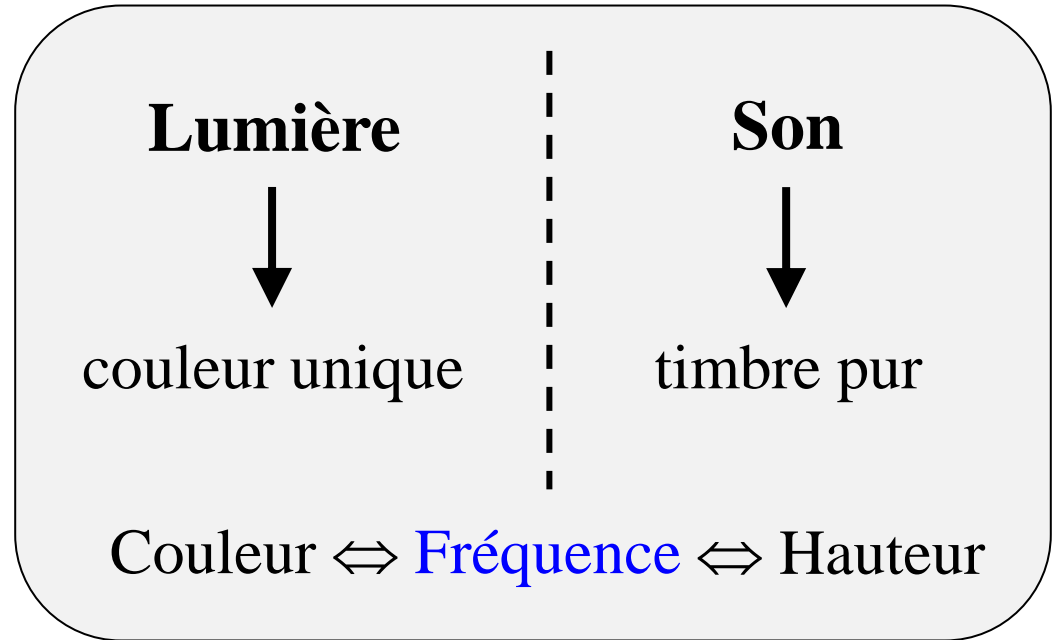
- Une (grosse) parenthèse sur la description et les caractéristiques des signaux



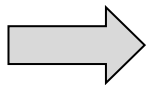
Le spectre



Fréquence
Intensité

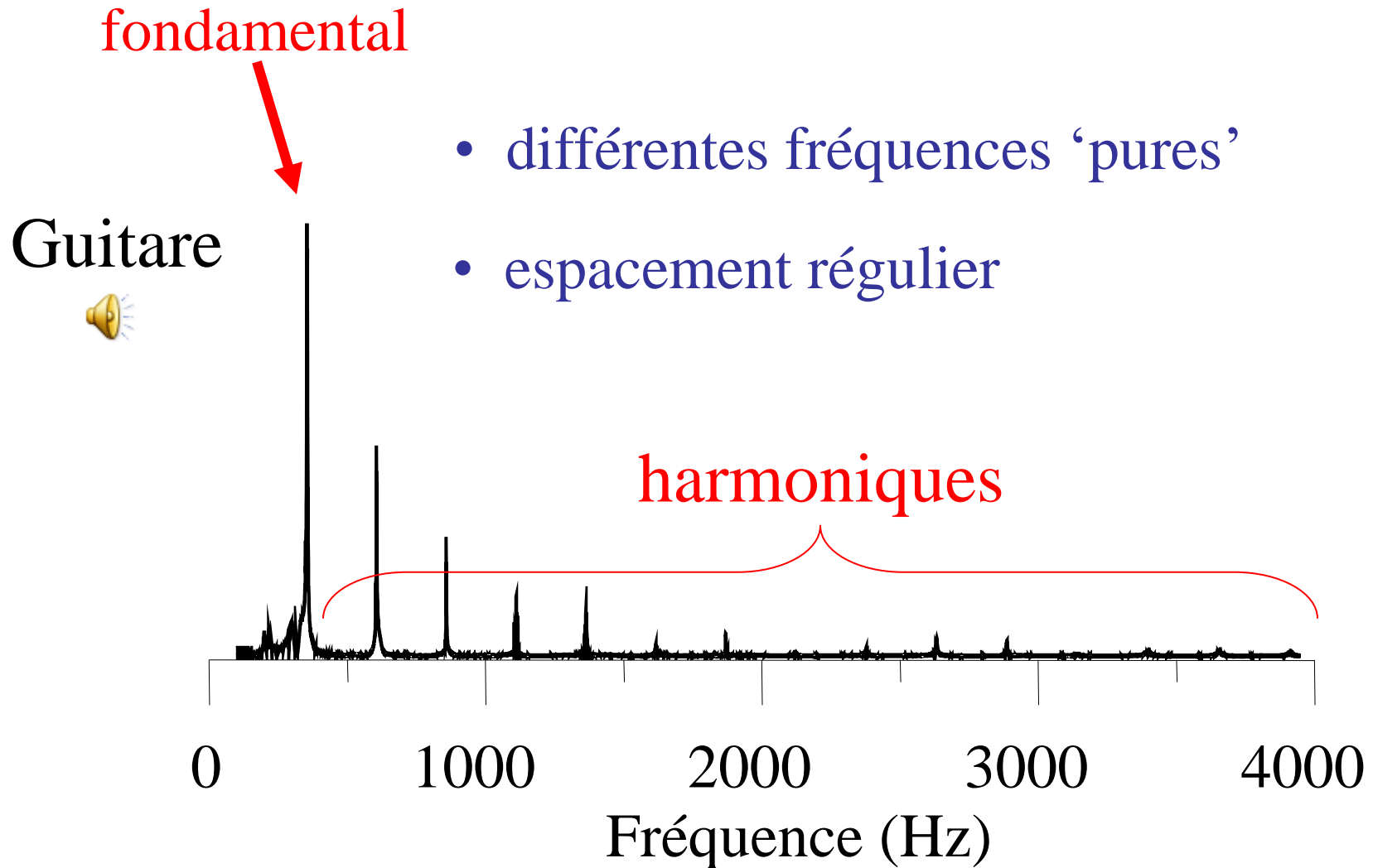


Spectre du son = une méthode pour construire un son à partir de timbres purs

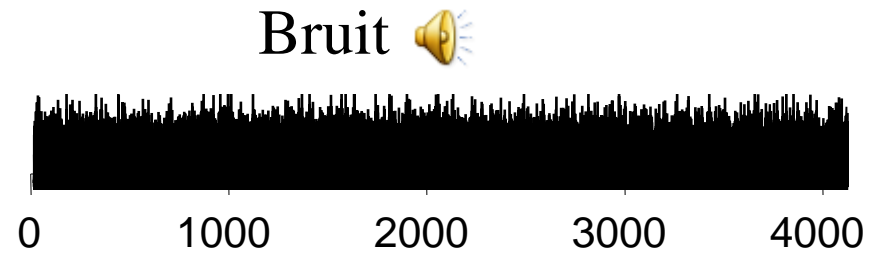
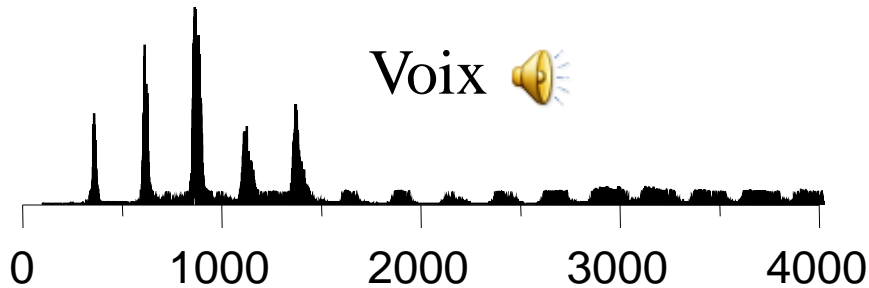
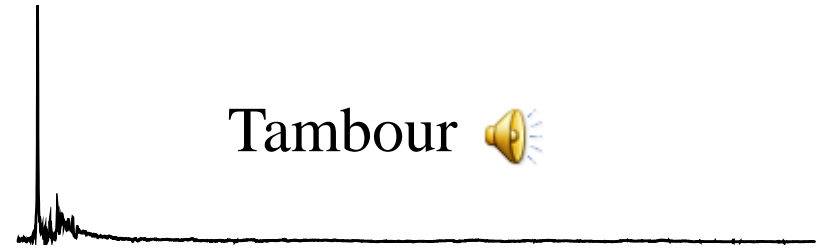
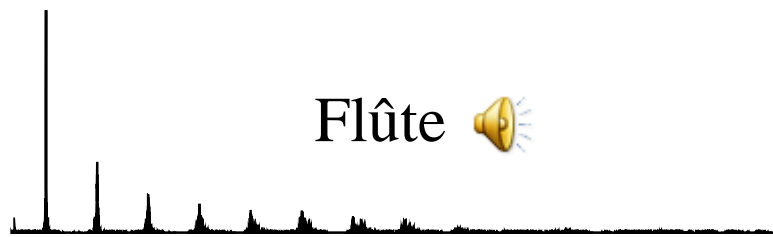
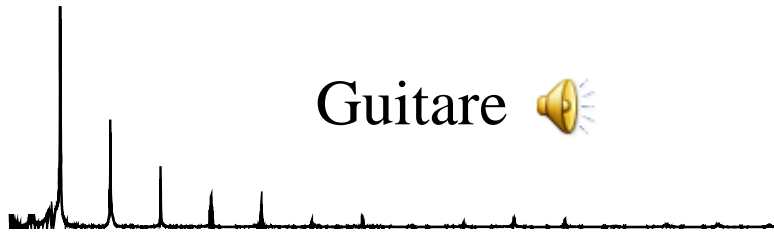


Exemple des instruments de musique

Spectre d'un son 'harmonique'



'Couleur' du son et spectre



Fréquence (Hz)

Fréquence (Hz)

‘Couleur’ du son et spectre

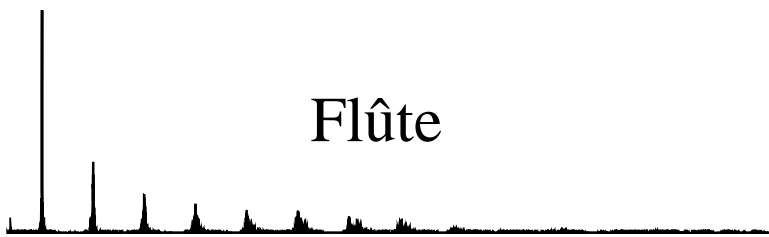
Timbre du son = sa ‘couleur’
(même hauteur, même intensité)

→ contrôlé par l’amplitude relative
des harmoniques

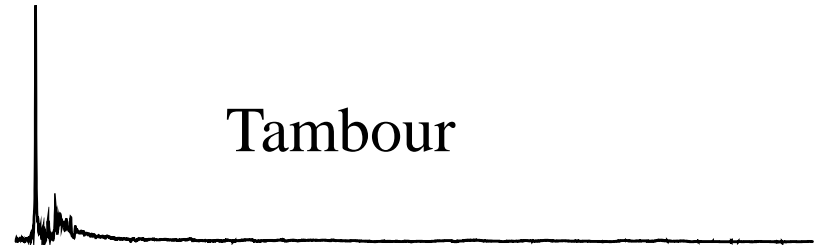
Guitare



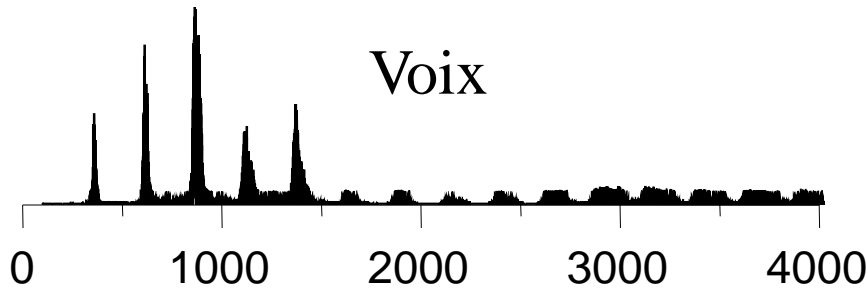
Flûte



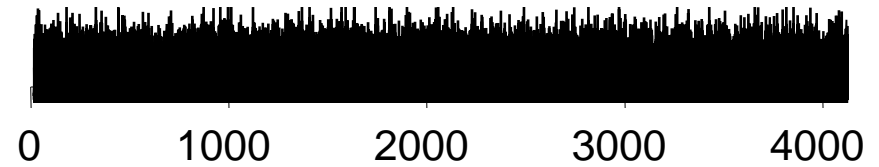
Tambour



Voix



Bruit



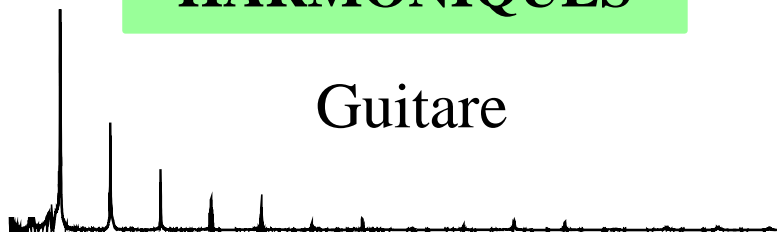
Fréquence (Hz)

Fréquence (Hz)

'Couleur' du son et spectre

HARMONIQUES

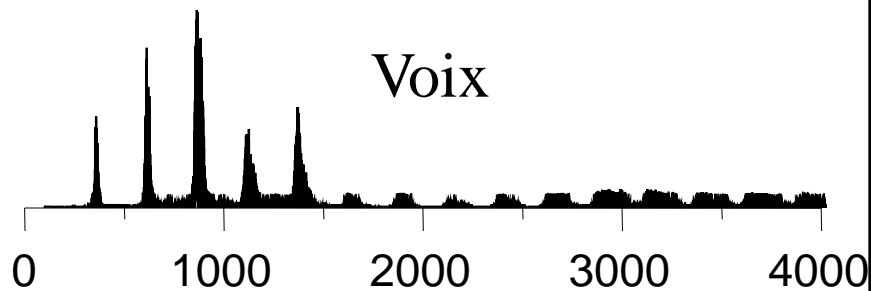
Guitare



Flûte



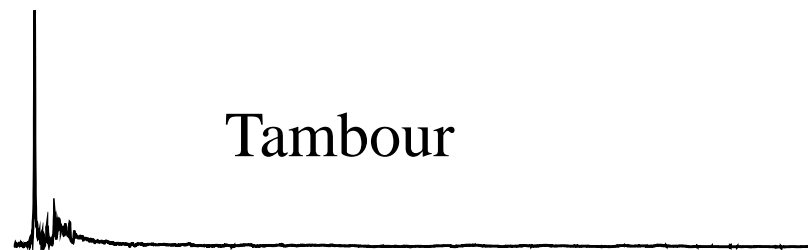
Voix



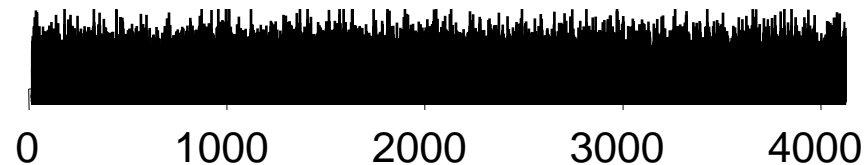
Fréquence (Hz)

NON-HARMONIQUES

Tambour



Bruit

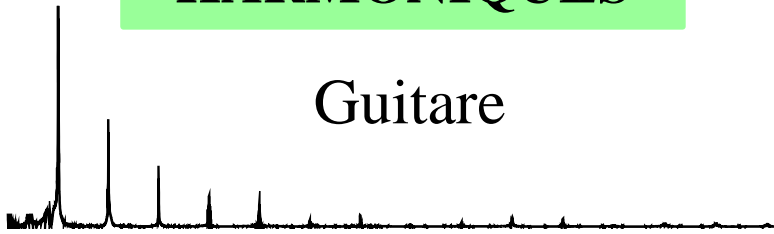


Fréquence (Hz)

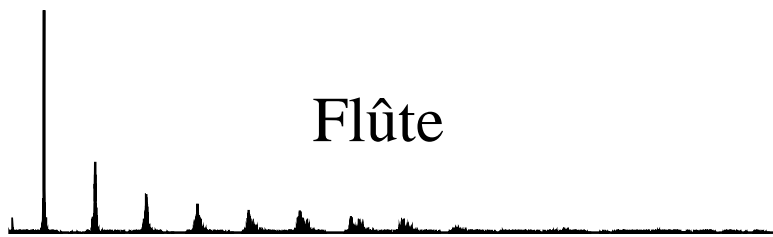
'Couleur' du son et spectre

HARMONIQUES

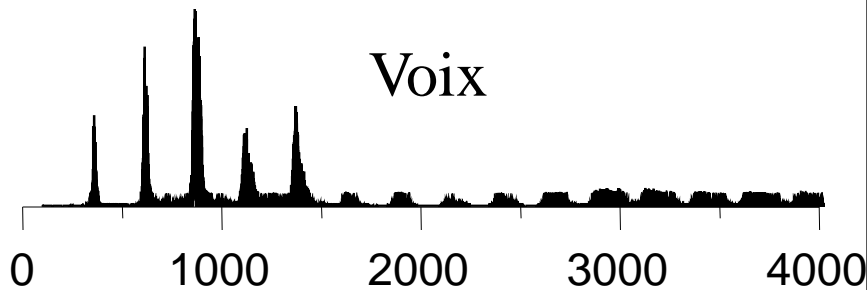
Guitare



Flûte



Voix



Fréquence (Hz)

Son harmonique =
espacement régulier des
harmoniques dans le spectre

... mais quel mécanisme physique
permet de générer la structure
régulière du spectre d'un signal
harmonique ?

→ exemple de la guitare
et de la flûte

Exemple de la guitare



On pince les cordes

Exemple de la guitare

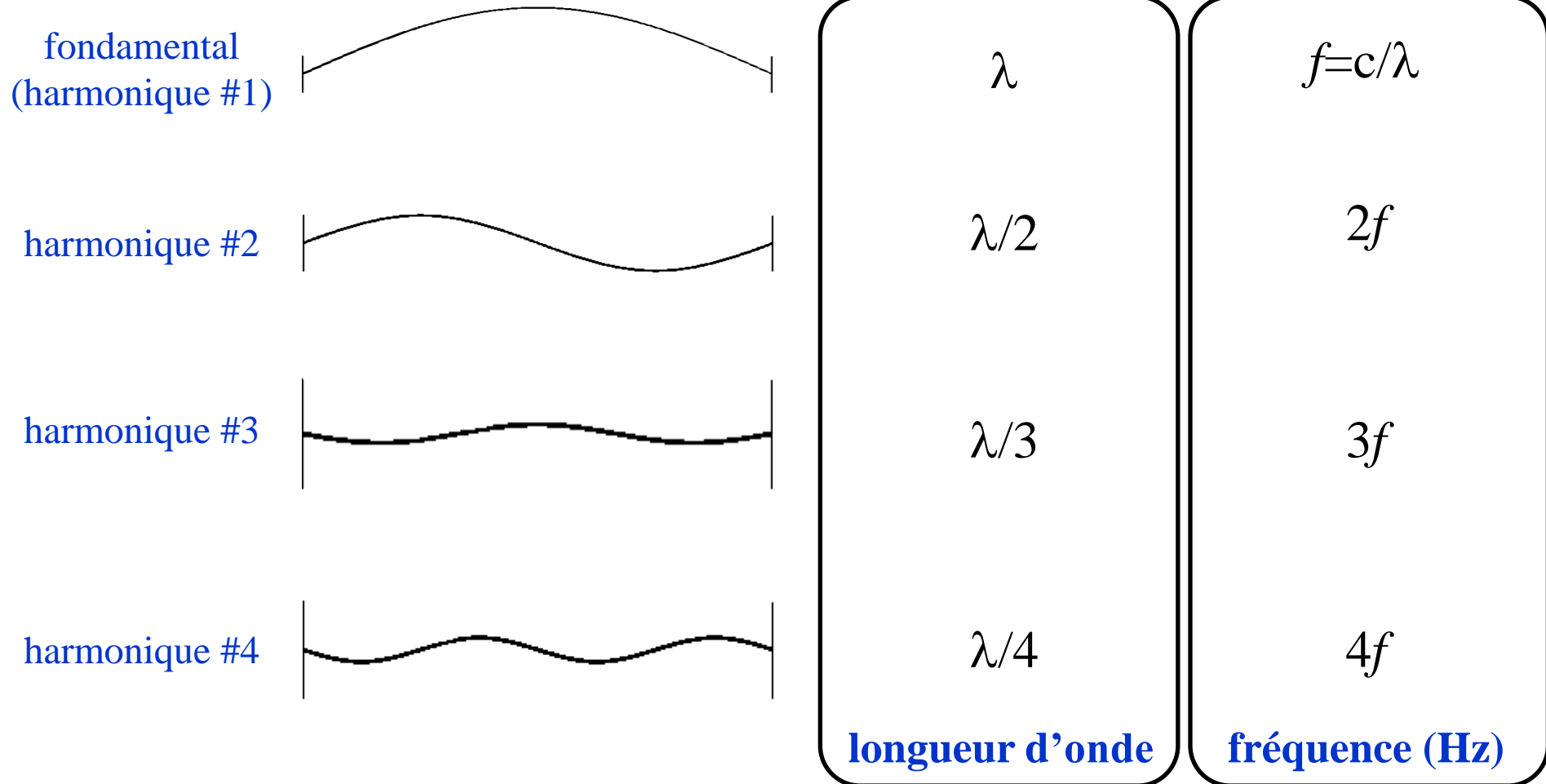


On pince les cordes → vibrations

Modes propres d'une corde fixe

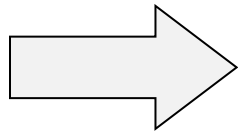
Vibrations possibles de la corde = 'Modes propres'

... *fixés par les conditions limites !*



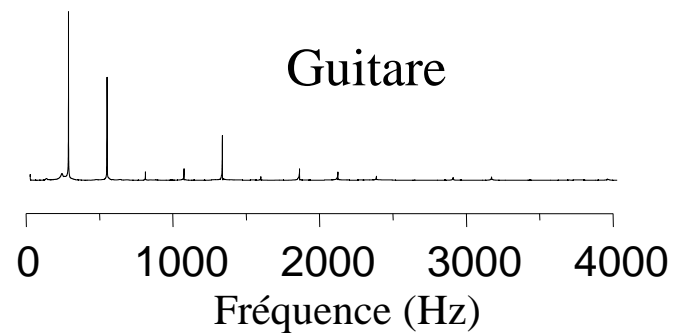
Modes propres d'une corde fixe

- Existence de fréquences propres
- Les fréquences propres d'une corde fixe sont toujours multiples entiers de la fréquence fondamentale

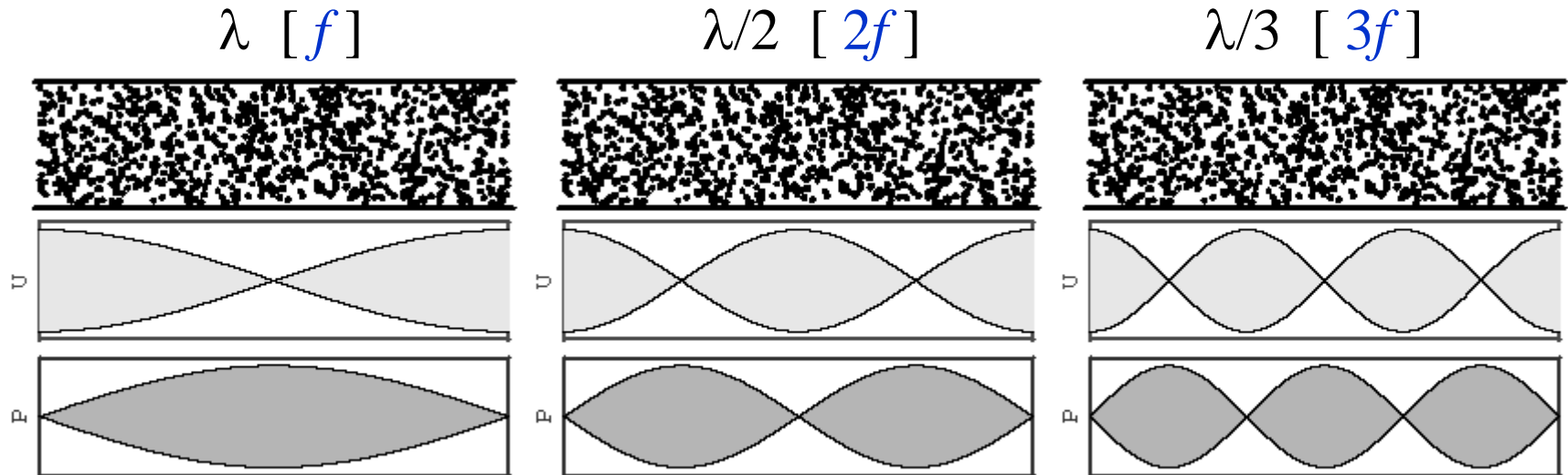


Structure régulière du spectre

... et les amplitudes relatives des différents harmoniques déterminent le timbre du son !

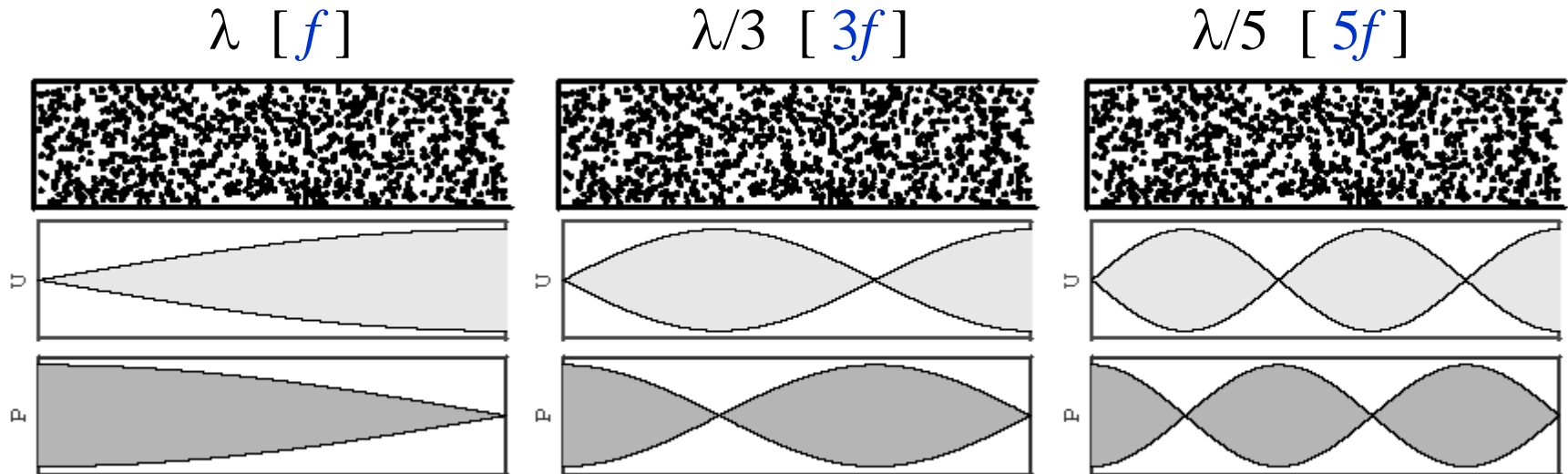


Exemple de la flûte traversière



Conditions limites symétriques \longrightarrow rapport 1:2:3:... (tous les entiers)

Exemple de la flûte à bec



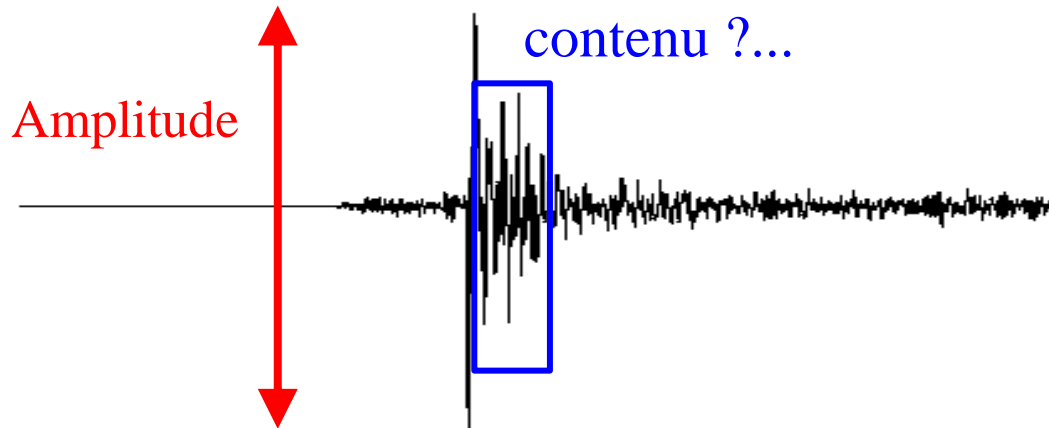
Conditions limites asymétriques → rapport 1:3:5:... (entiers impairs)



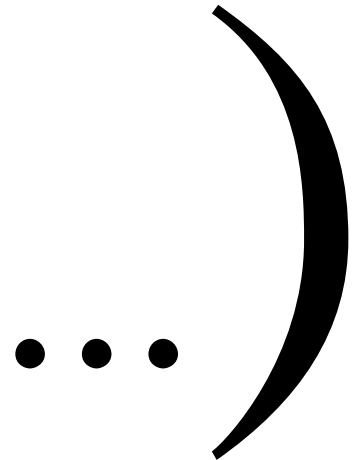
RESONANCE

Traitement du signal

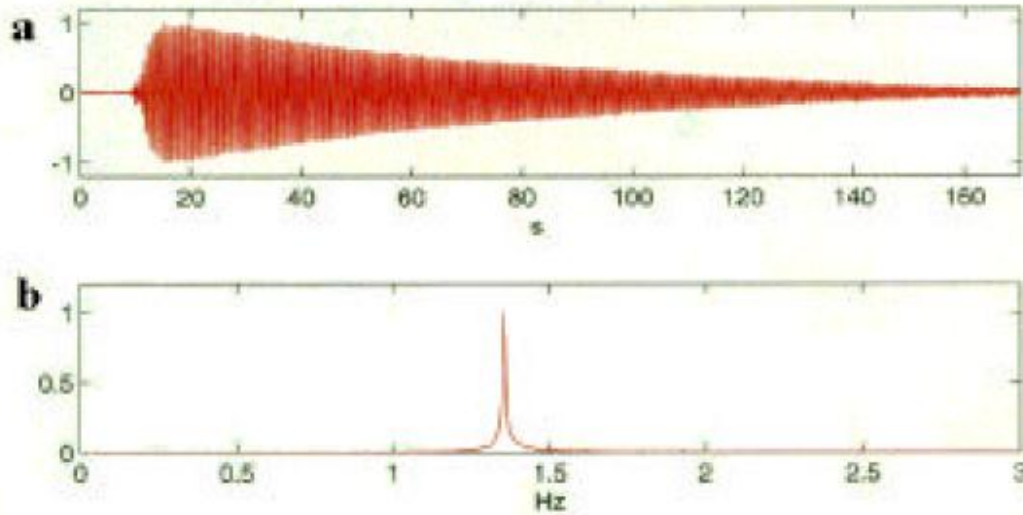
- Que peut-on extraire comme information d'un signal ?



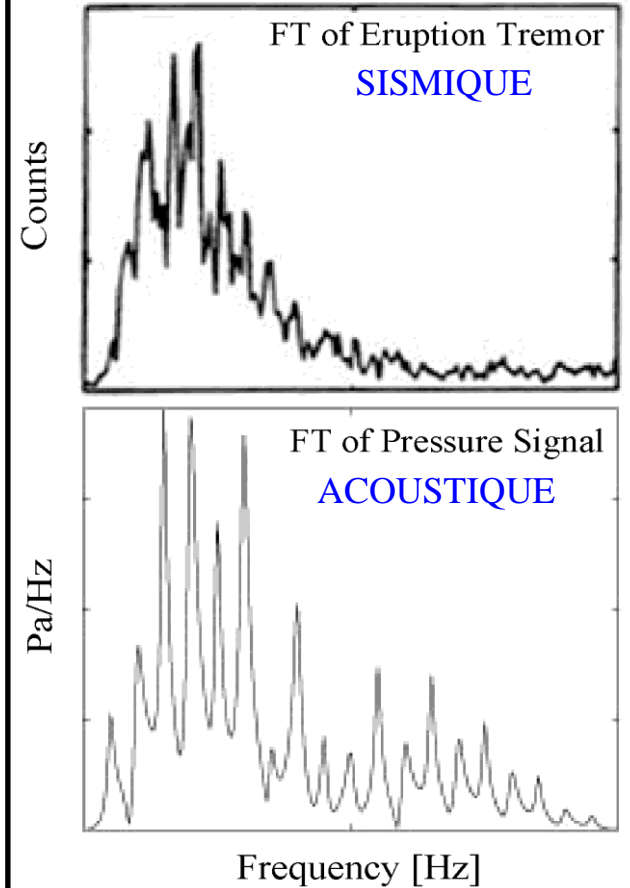
- Une (grosse) parenthèse sur la description et les caractéristiques des signaux



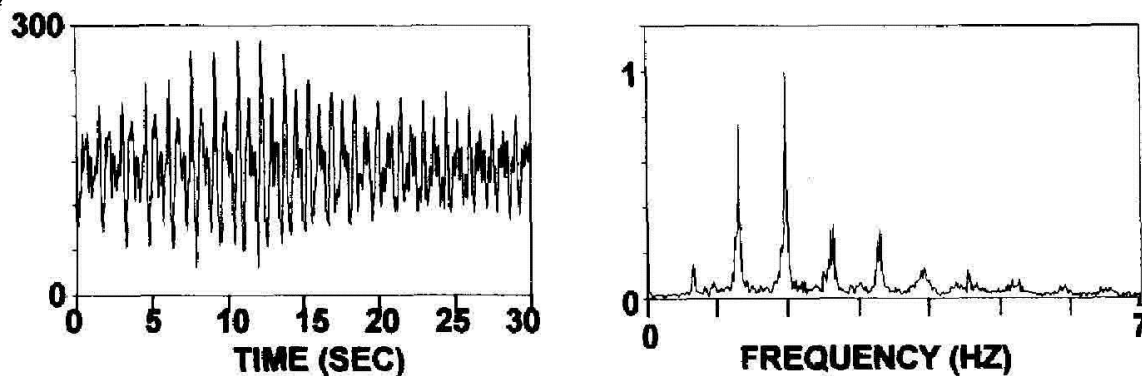
Signaux harmoniques sur les volcans ?



‘Tornillos’, volcan Galeras (Colombie, 1993)



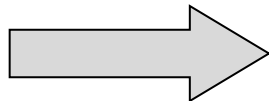
Eruption du Mt. Spurr
(Alaska, 1992)



‘Tremor’ harmonique, volcan Galeras (Colombie, 1991)

Que peut-on “écouter” ?

- **fréquence audible** : 20Hz – 20kHz
- **signal sismique** : mHz – 50Hz
- **signal acoustique** : 0.5Hz – 5kHz



il faut changer l'échelle !

Transposition

1. normal



The summer smiles, the summer knows

Transposition

1. normal



The summer smiles, the summer knows

2. transposition haute



The summer smiles, the summer knows

Transposition

1. normal



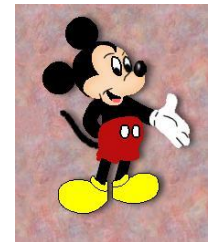
The summer smiles, the summer knows

2. transposition haute



The summer smiles, the summer knows

3. transposition très haute



Transposition

1. normal



The summer smiles, the summer knows

2. transposition haute



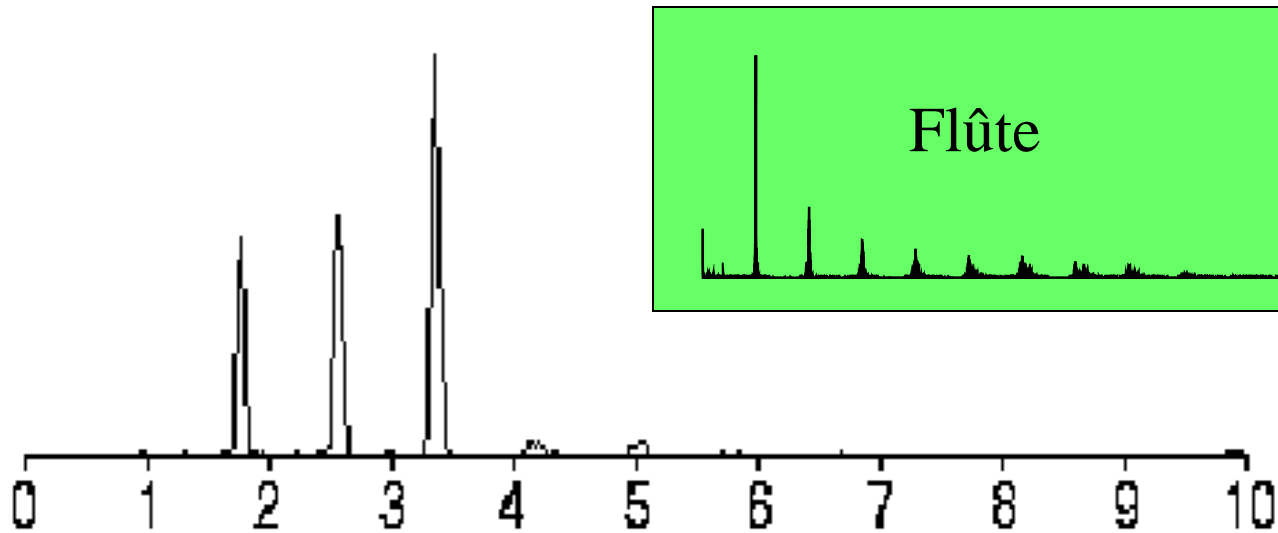
The summer smiles, the summer knows

3. transposition très haute



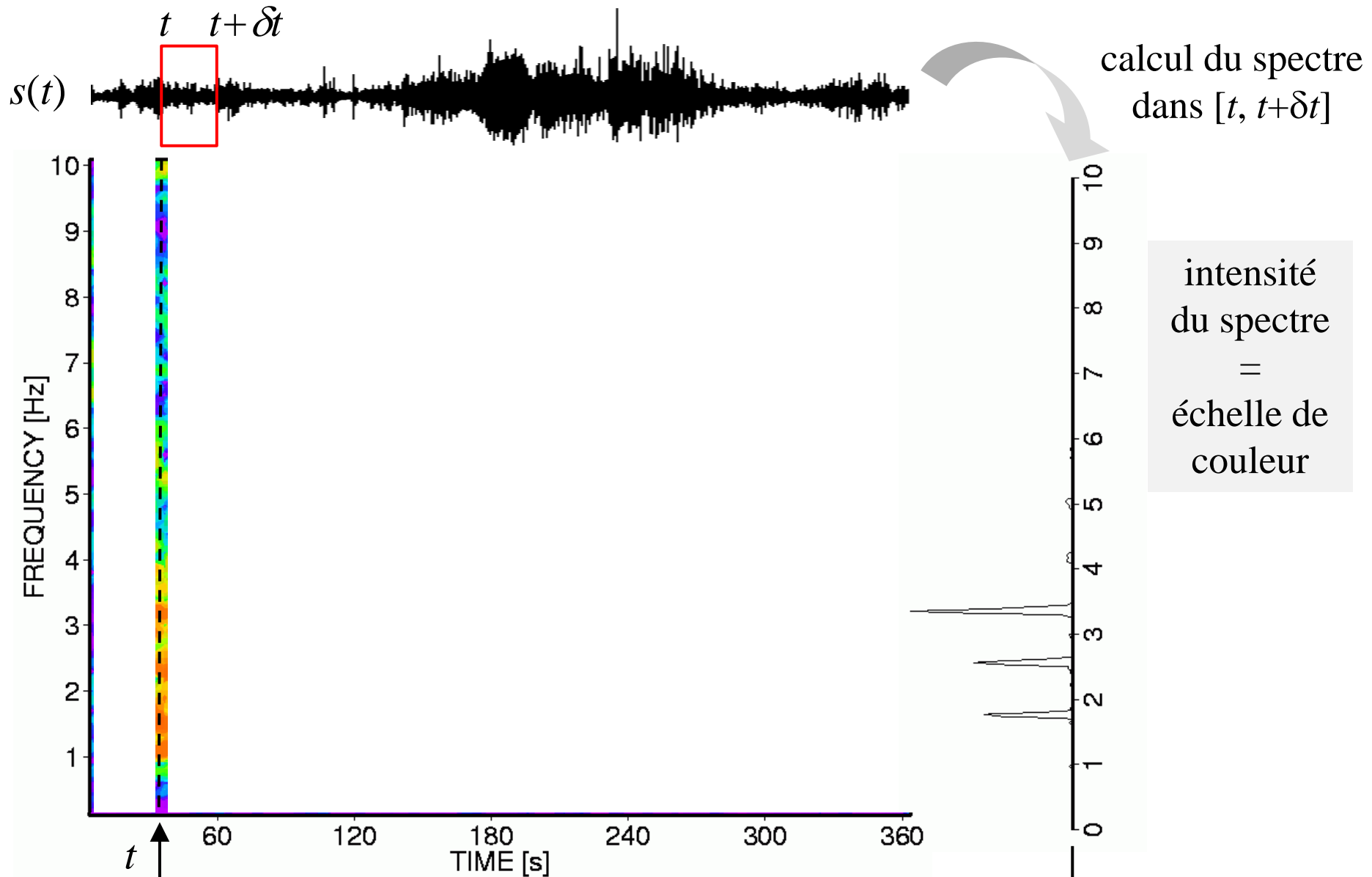
- Exemple de signaux harmoniques sur les volcans (transposés)

Volcan Semeru (Java, Indonésie)



Fréquence (Hz)

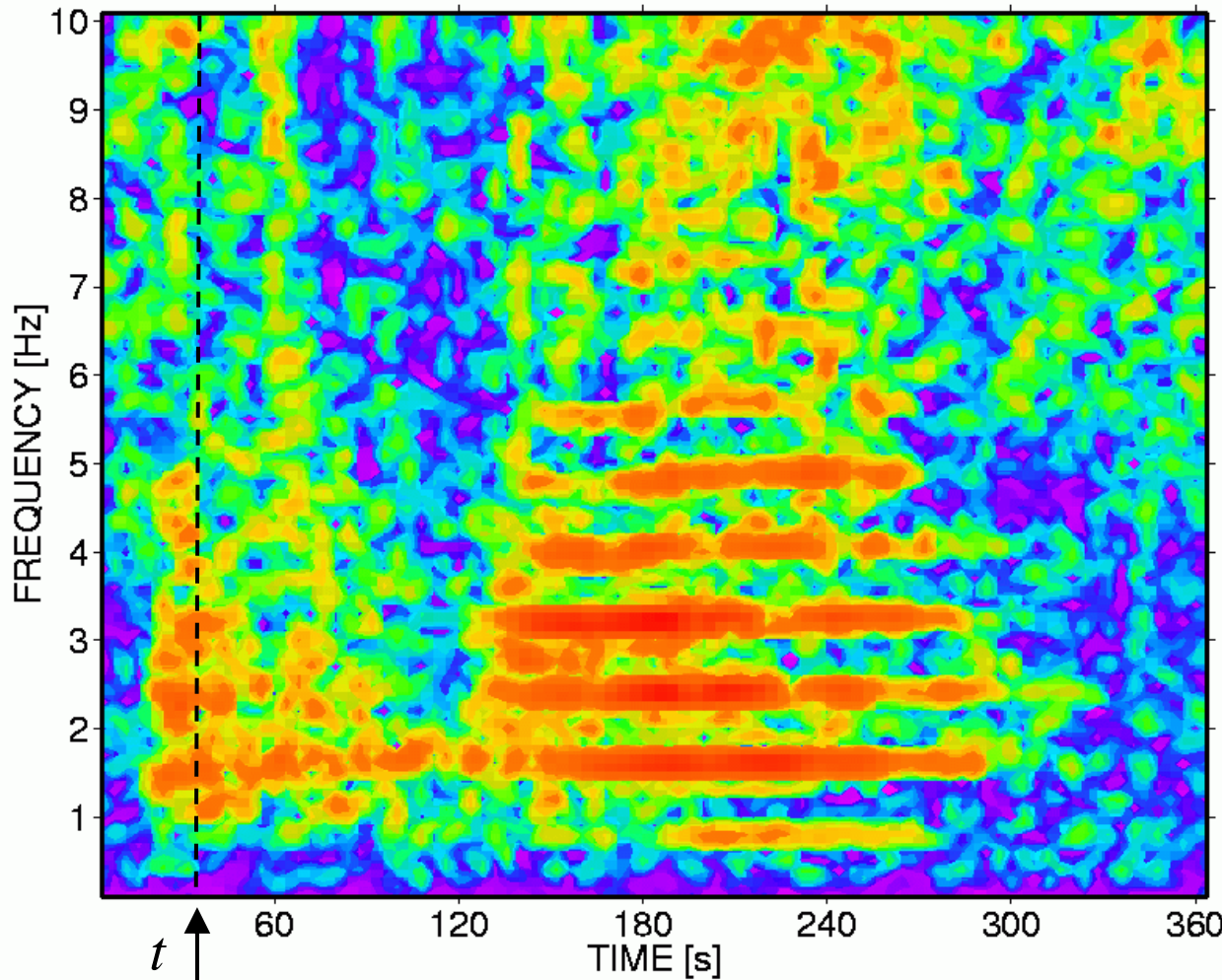
Volcan Semeru (Java, Indonésie)



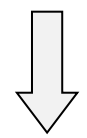
Volcan Semeru (Java, Indonésie)



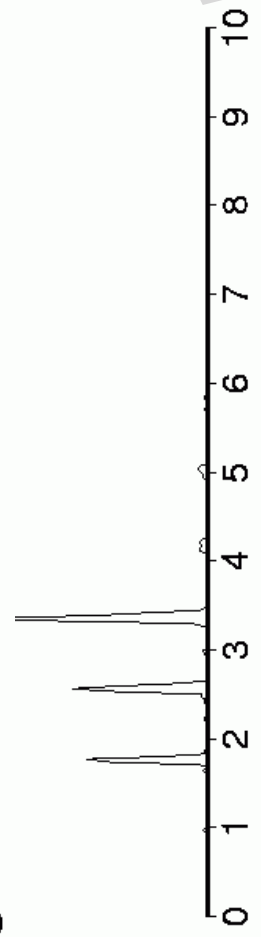
calcul du spectre
dans $[t, t + \delta t]$



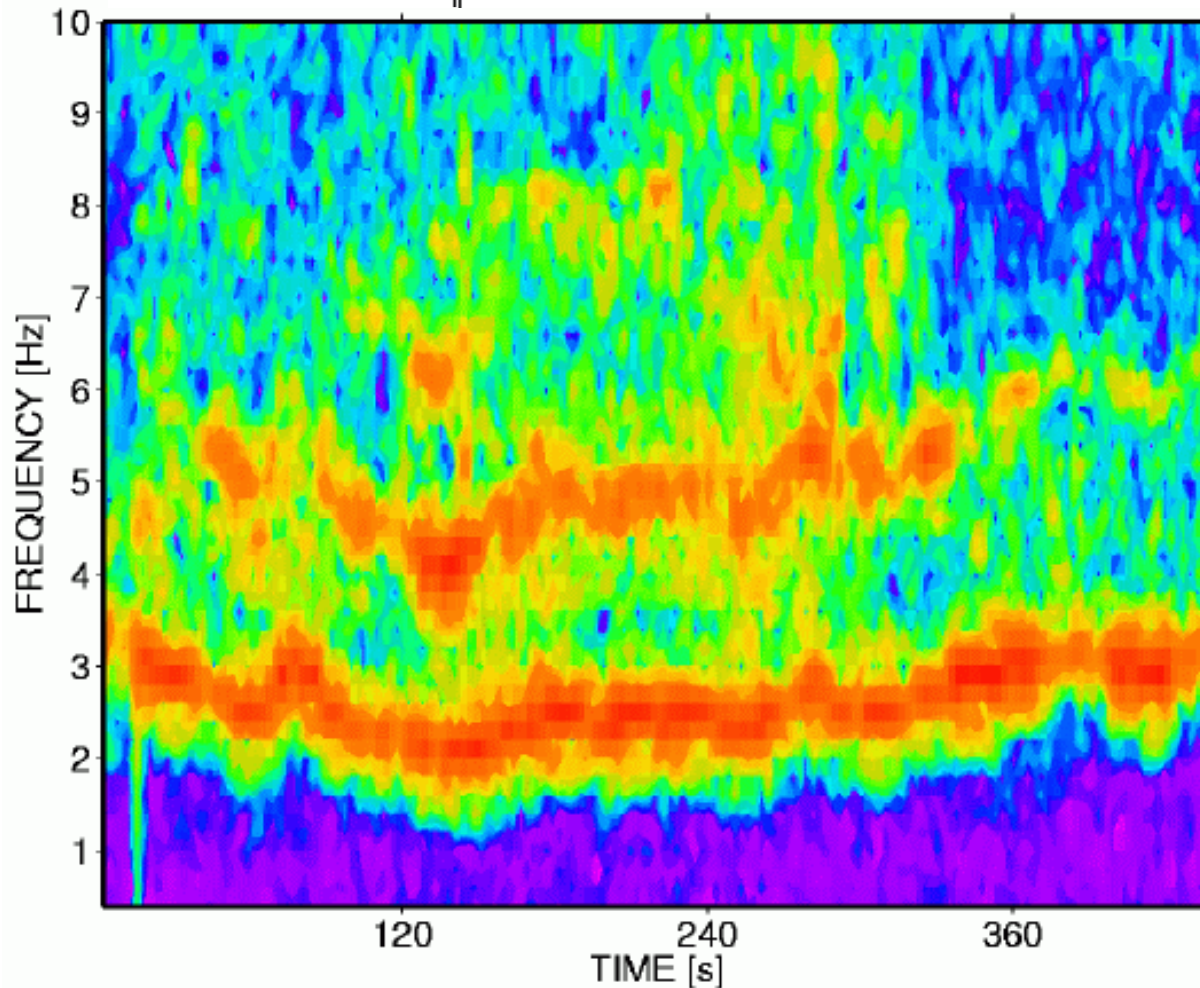
intensité
du spectre
=
échelle de
couleur



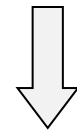
**SPECTRO
GRAMME**



Volcan Arenal (Costa Rica)



glissement des harmoniques

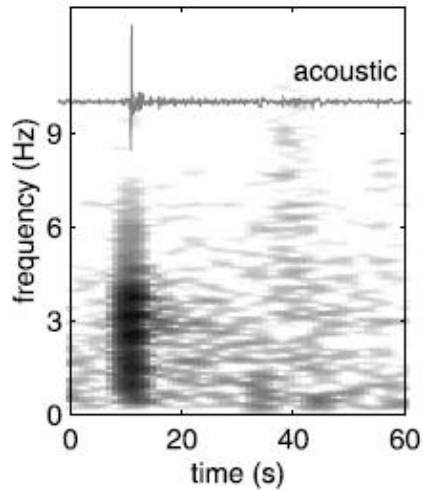


développement d'une « mélodie » !

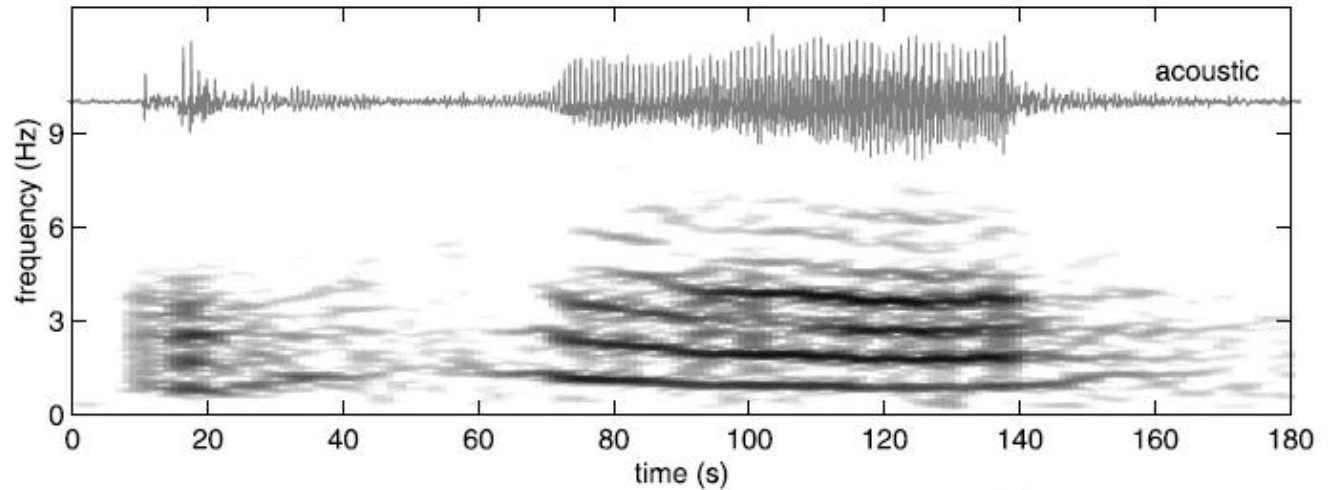
[échelle de couleur identique à la précédente]

La “symphonie” des volcans

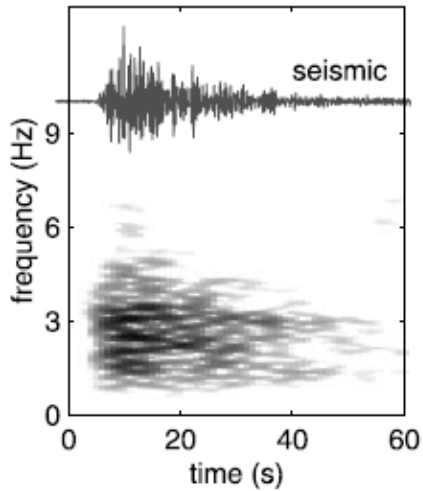
a) Simple Impulse Event (98:115:03:29)



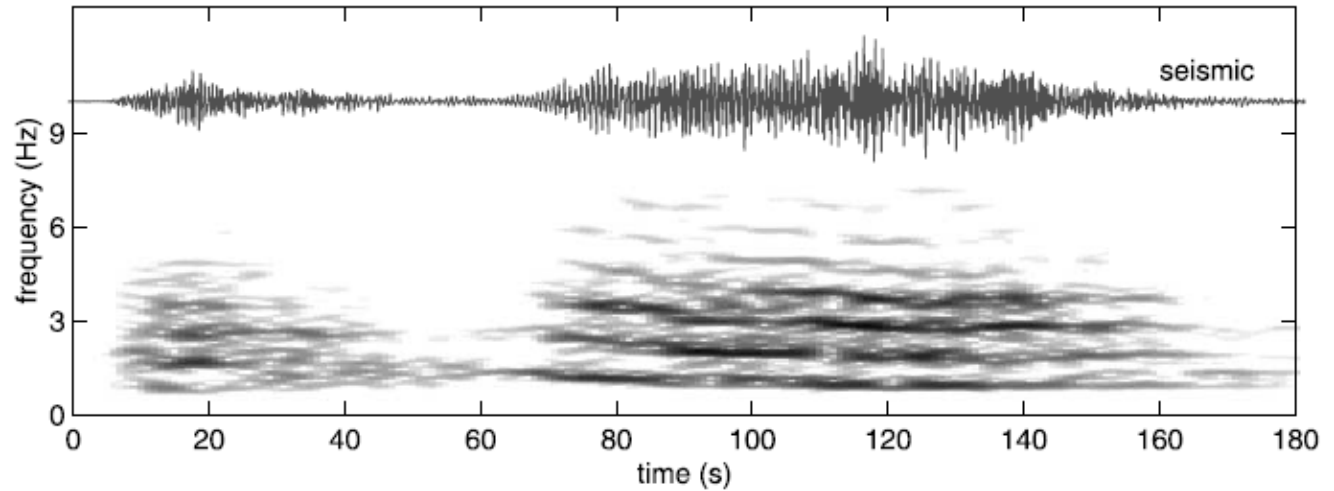
b) Chugging Event (98:115:23:12)



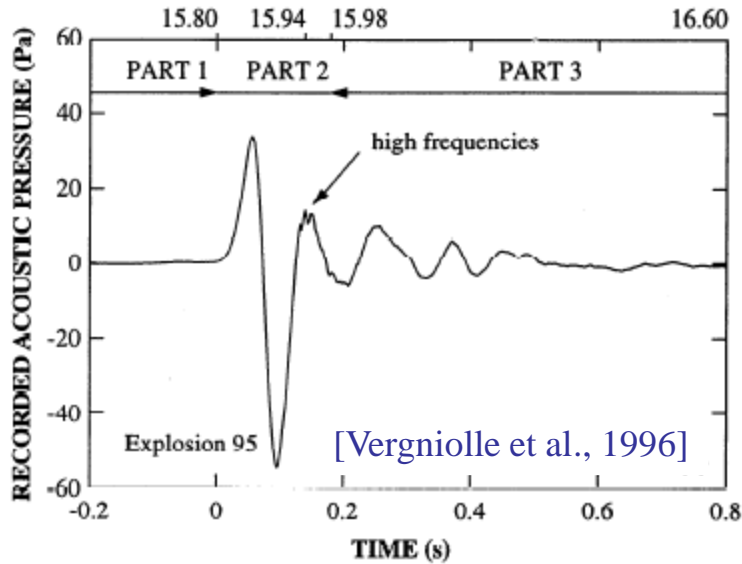
a) Simple Impulse Event (98:115:03:29)



b) Chugging Event (98:115:23:12)

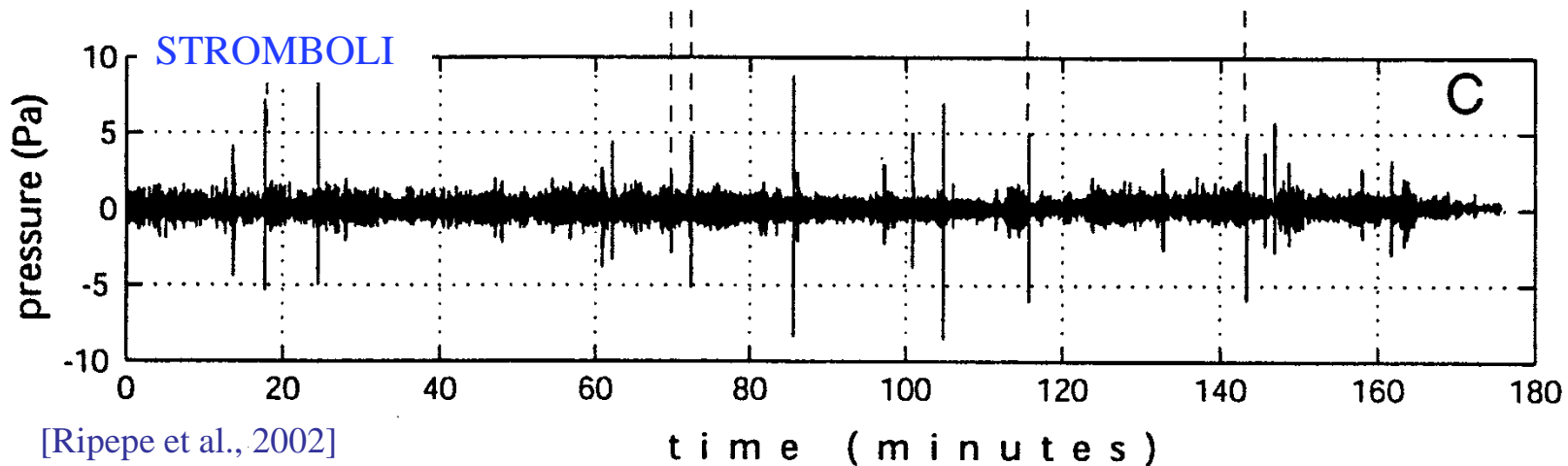


La “symphonie” des volcans



Quel mécanisme peut générer des signaux harmoniques ?

- Forme d'onde acoustique ?
- Périodicité des explosions ?



Modèles de source, Stromboli

Explosion dans le magma en profondeur

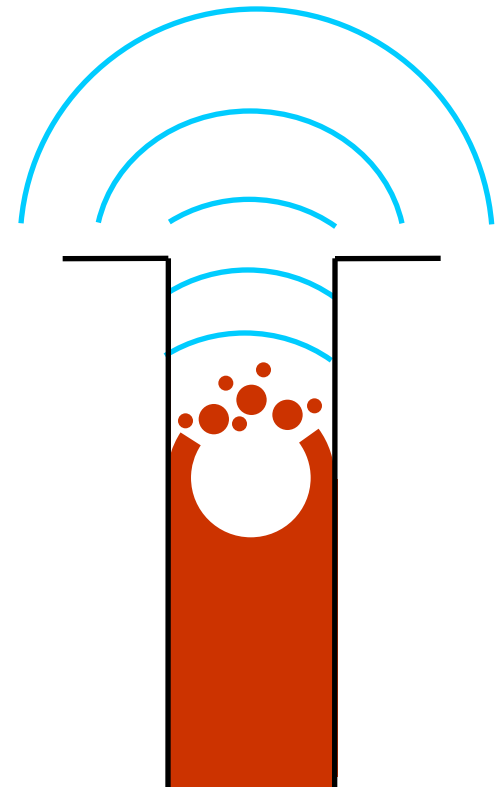
[Buckingham & Garces,1996]

Expansion d'une bulle géante en surface

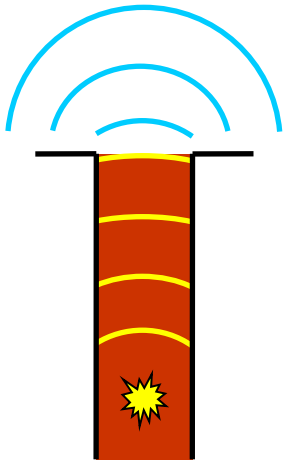
[Vergniolle & Brandeis,1996]

Eclatement de bulle(s) dans le conduit

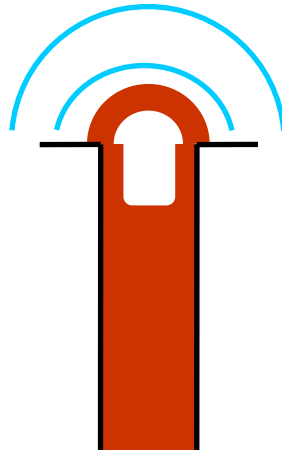
[Ripepe et al.,2001]



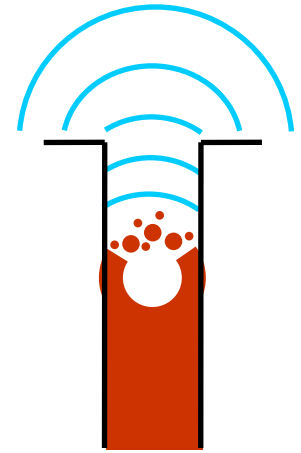
Expériences de laboratoire ?



Explosion dans le magma
[Buckingham & Garcés, 1996]



Expansion d'une bulle en surface
[Vergnolle & Brandeis, 1996]



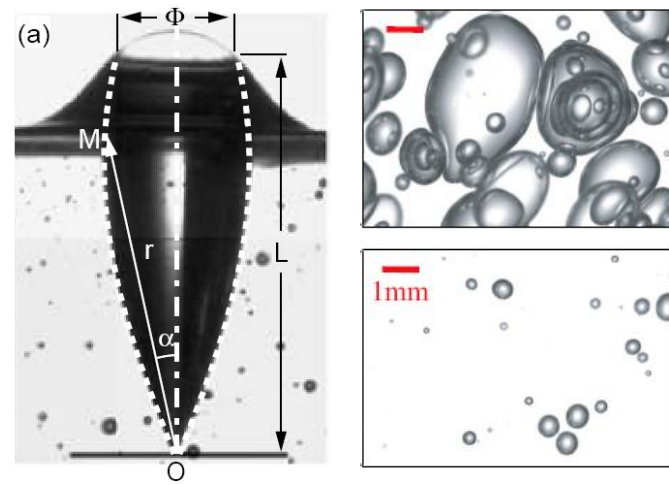
Eclatement de bulles
[Ripepe et al., 2001]

- Remontée et éclatement de bulles -

Modélisation en laboratoire

Reproduire l'acoustique des volcans en laboratoire ?

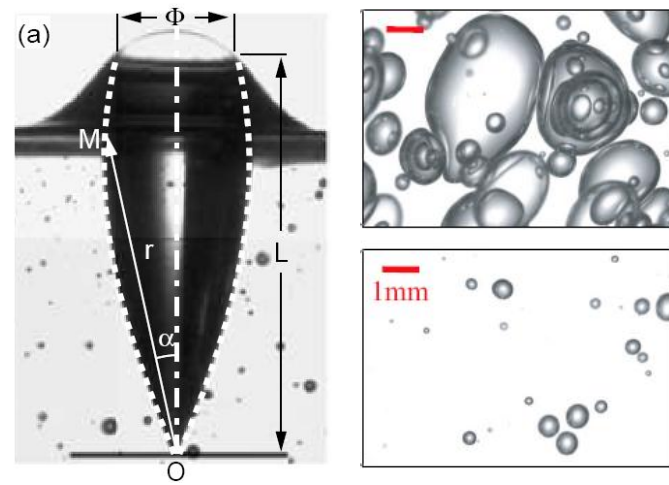
- Acoustique de l'éclatement de bulles
 - *Cavité résonante : une bulle « modèle »*
 - *Bulle unique en surface d'un fluide*
 - *Variations en régime continu*



Modélisation en laboratoire

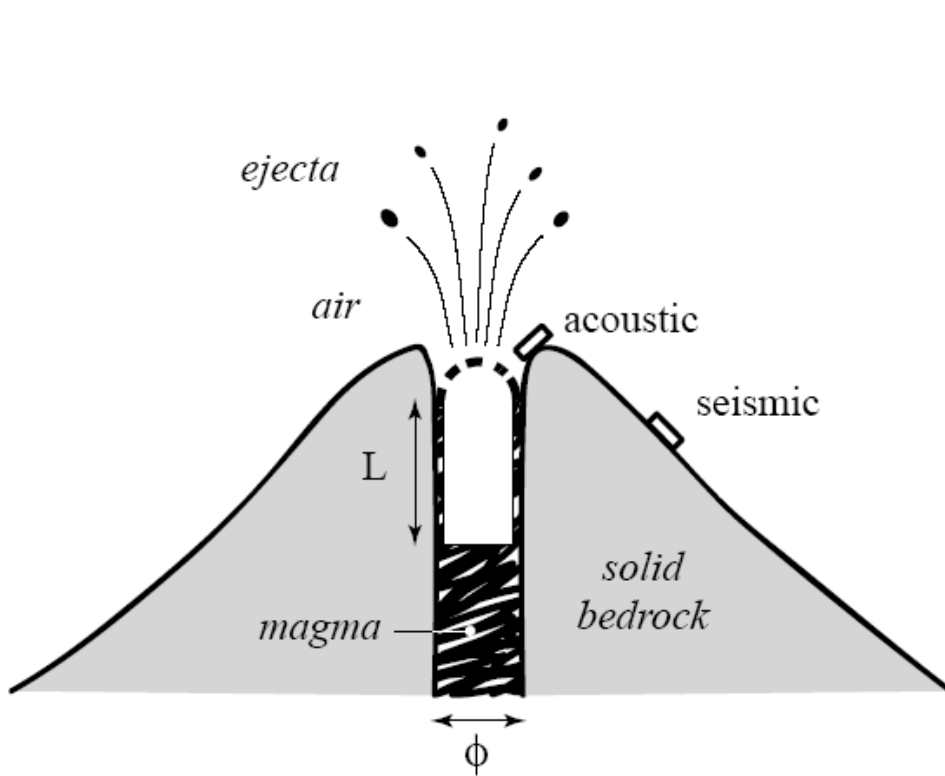
Reproduire l'acoustique des volcans en laboratoire ?

- Acoustique de l'éclatement de bulles
 - *Cavité résonante : une bulle « modèle »*
 - *Bulle unique en surface d'un fluide*
 - *Variations en régime continu*

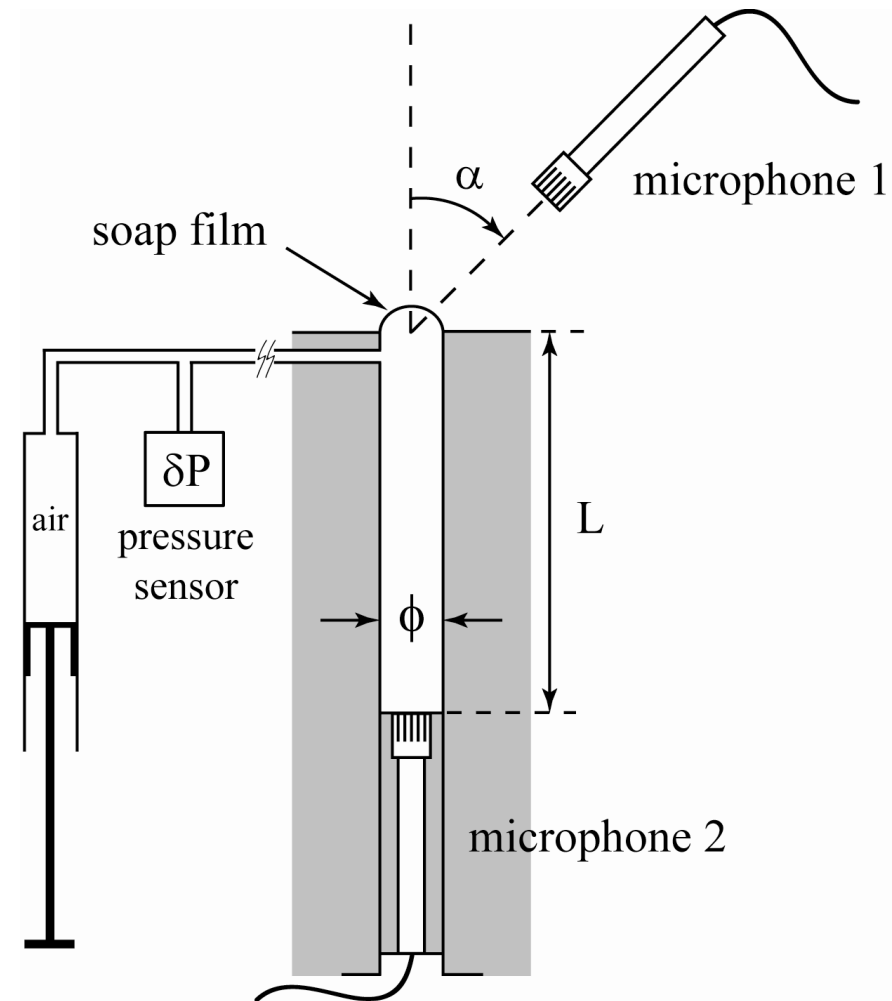


Une bulle “modèle”

- Eclatement d'un film de savon fermant une cavité en surpression



Le modèle
le plus simple



Une bulle “modèle” : description

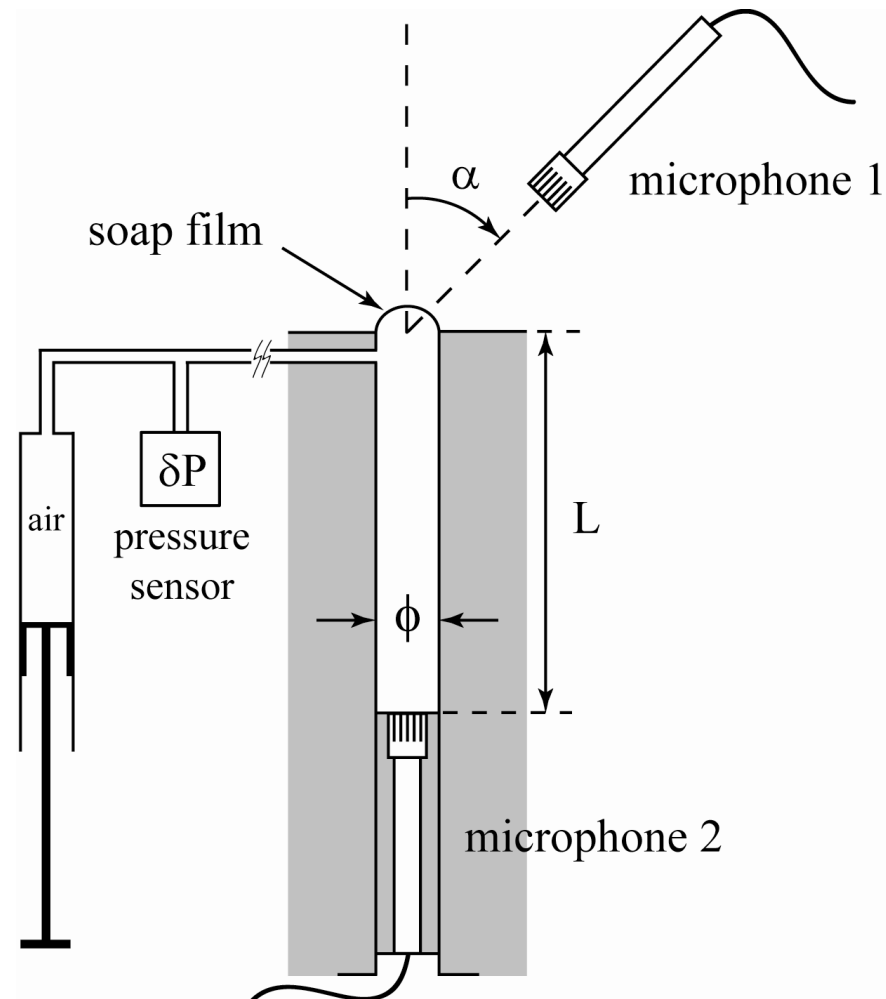
- Eclatement d'un film de savon fermant une cavité en surpression

Paramètres :

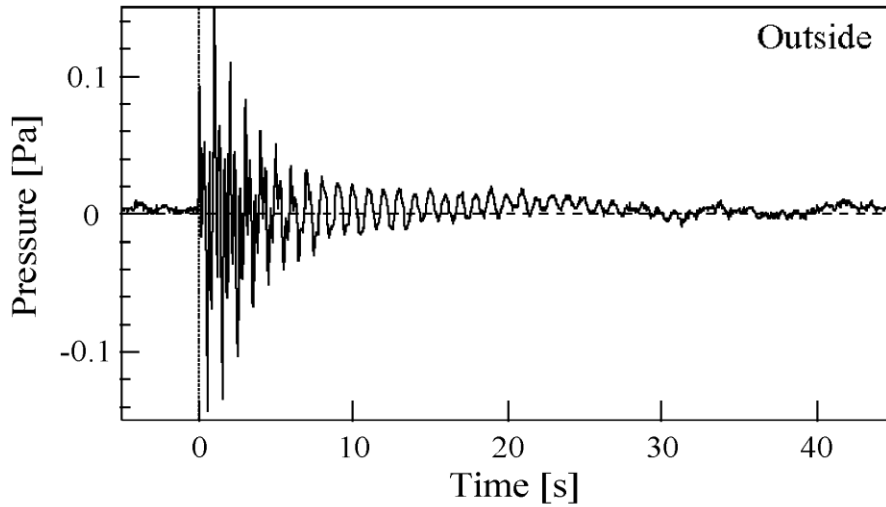
- longueur du tube L
- diamètre Φ (rapport d'aspect $\alpha=L/\Phi$)
- surpression δP



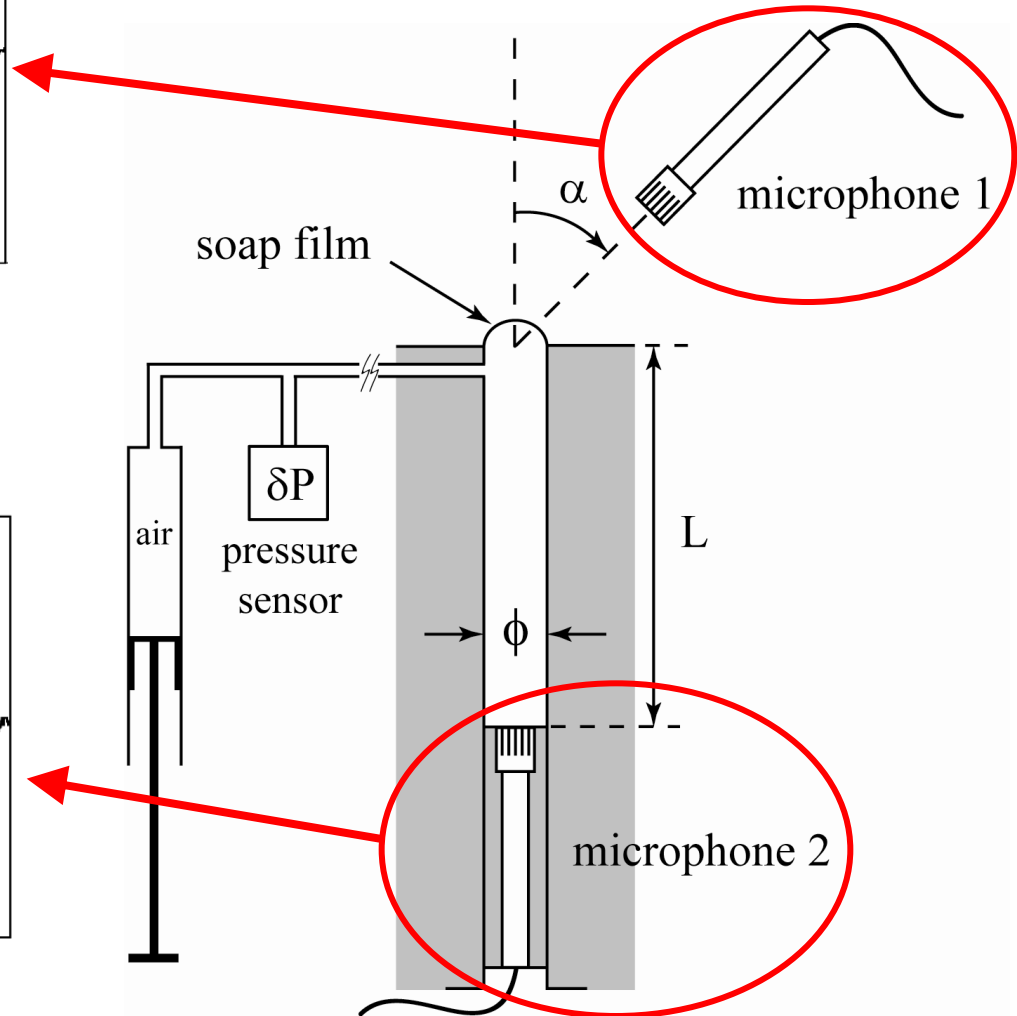
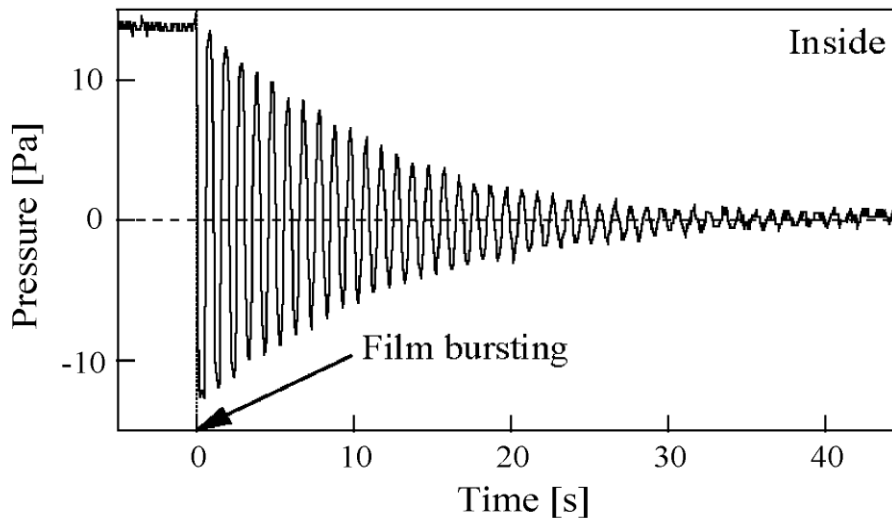
Analyse des ondes
acoustiques générées par
l'éclatement de la “bulle”
(expérience et théorie)



Une bulle “modèle” : description

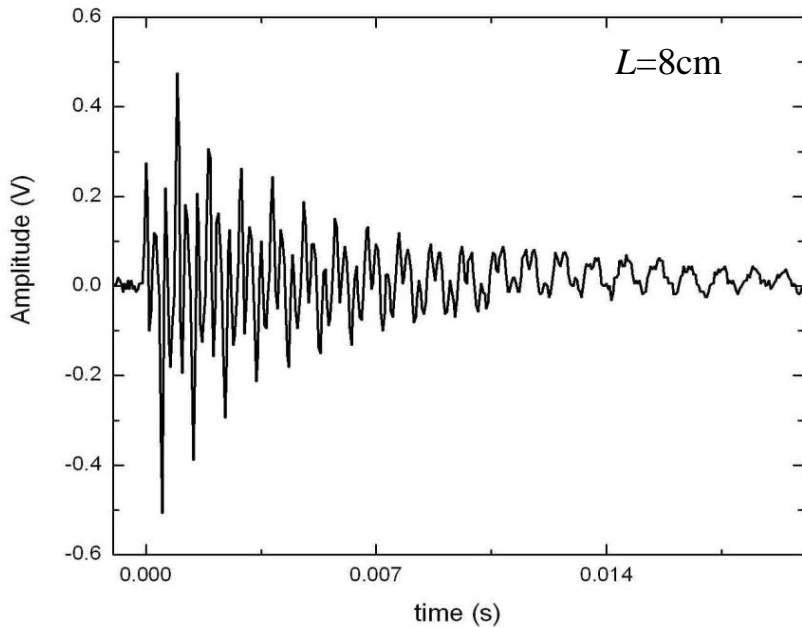


Signaux acoustiques



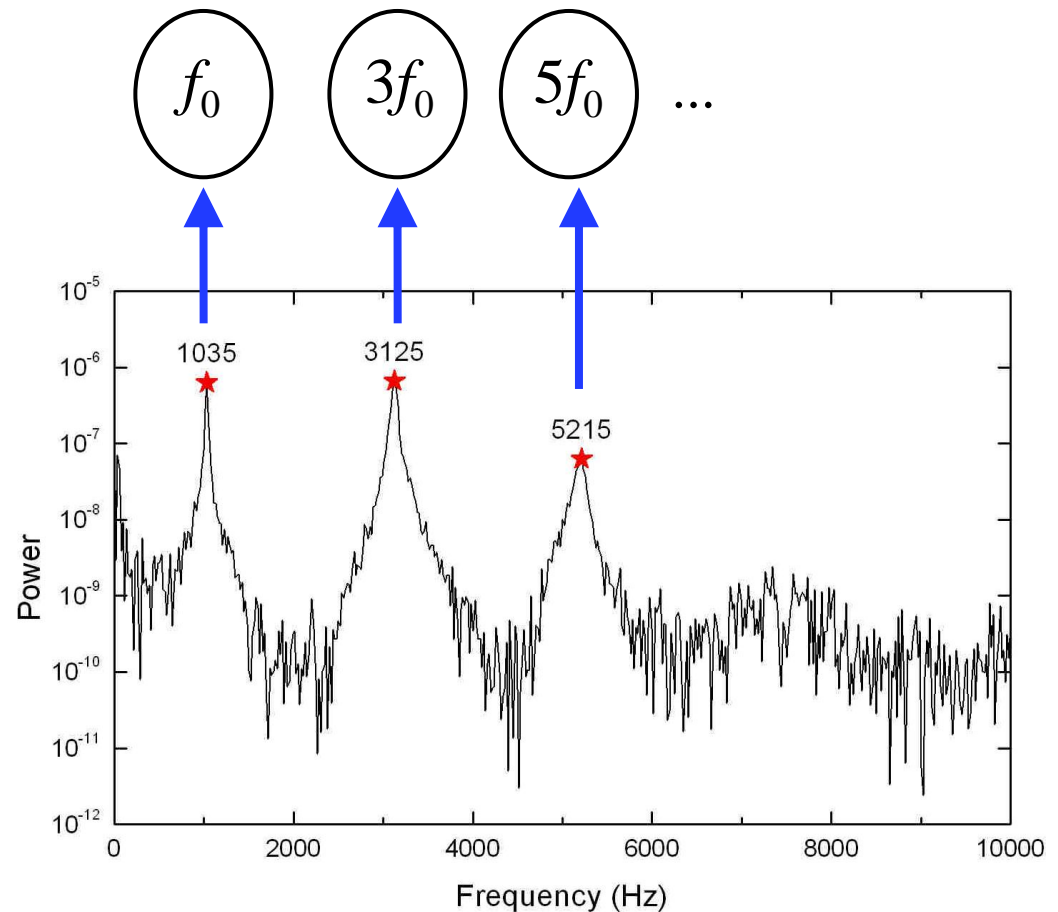
Une bulle “modèle” : spectre

- Contenu en fréquence ?



→ résonance d'un tube
aux conditions limites
asymétriques

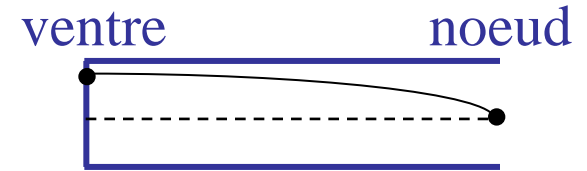
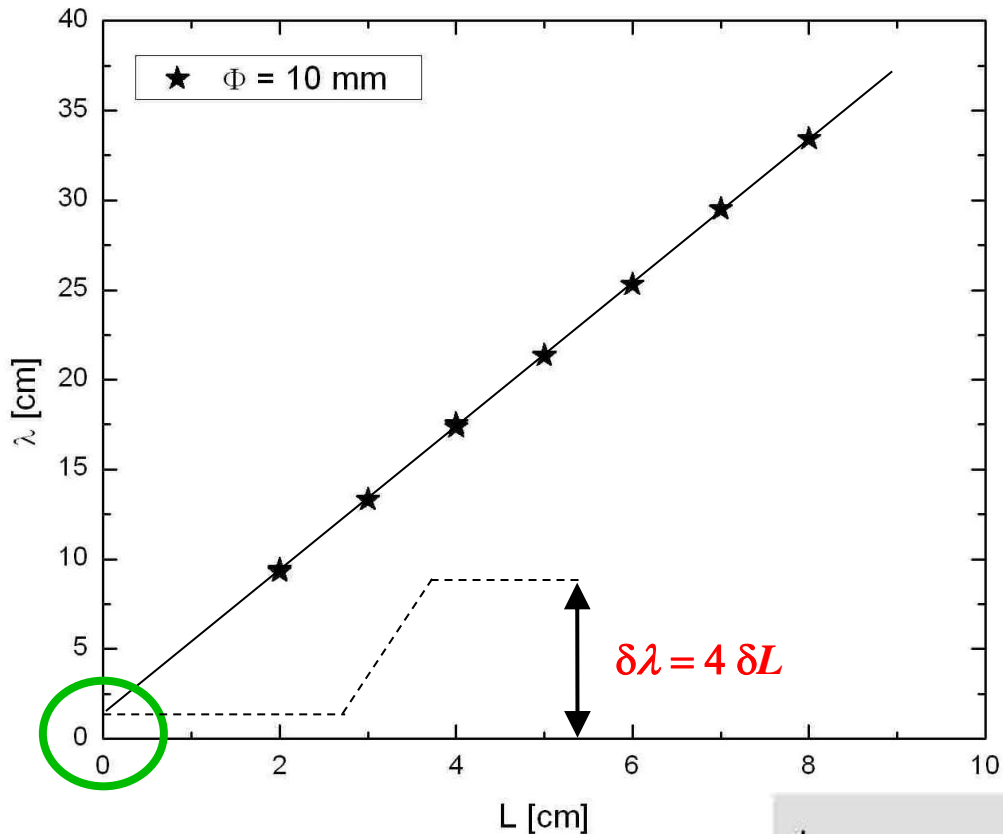
fondamental & harmoniques impairs



Analyse de la fréquence fondamentale

- Fréquence / longueur d'onde du fondamental

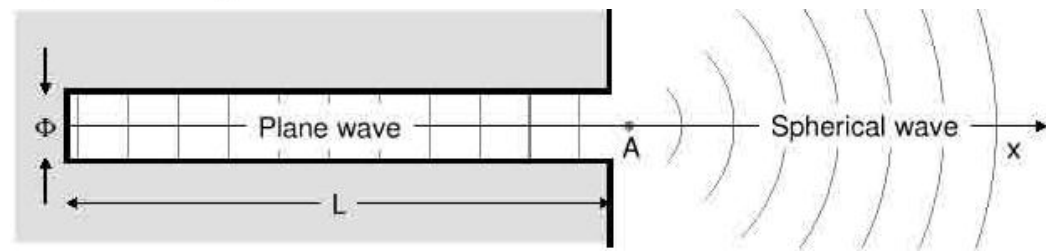
$$\lambda = c/f$$



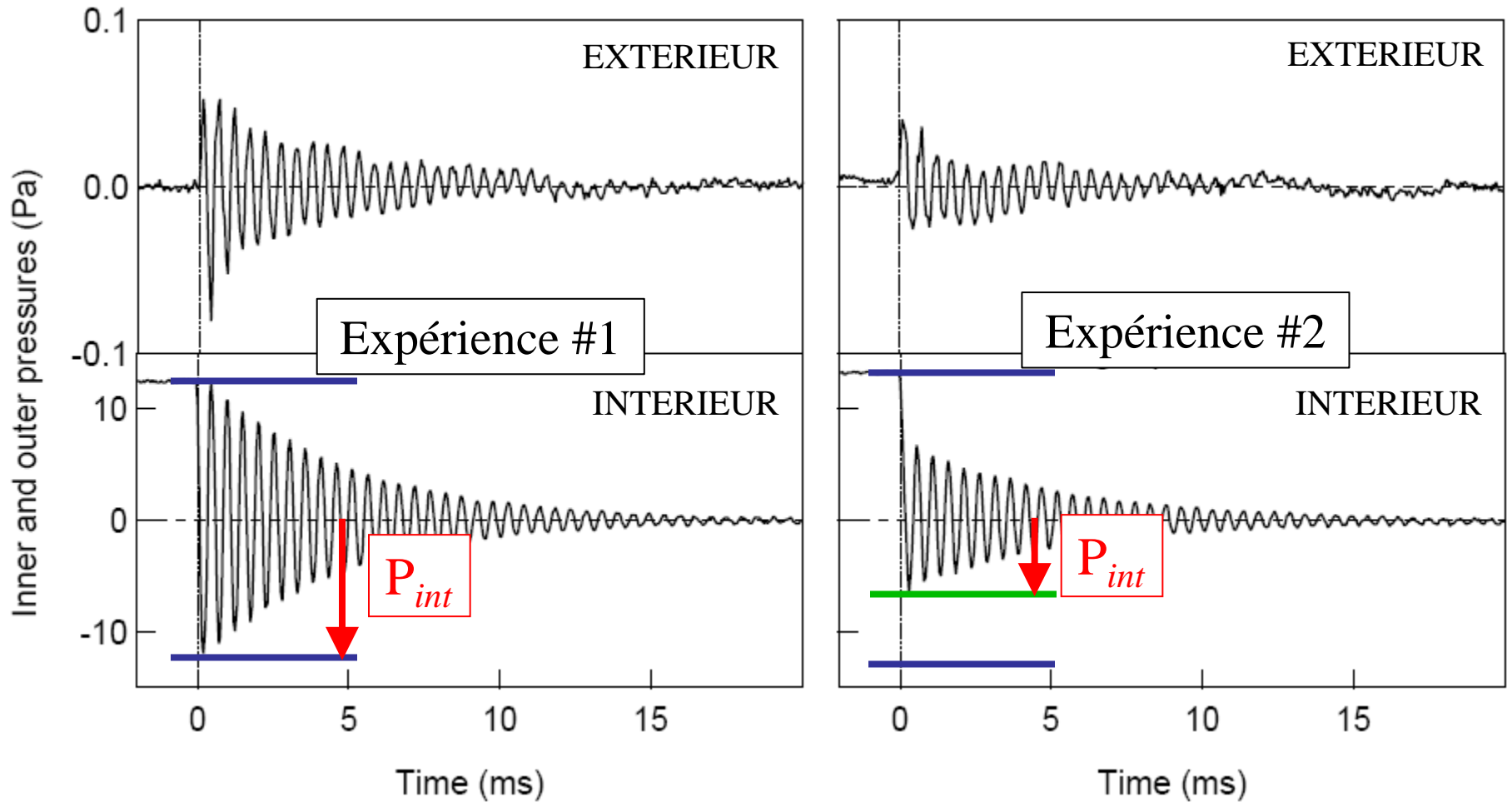
$$\lambda = 4(L + \delta L)$$

résonance
'classique' d'un tube

$\delta L = \text{radiation...}$

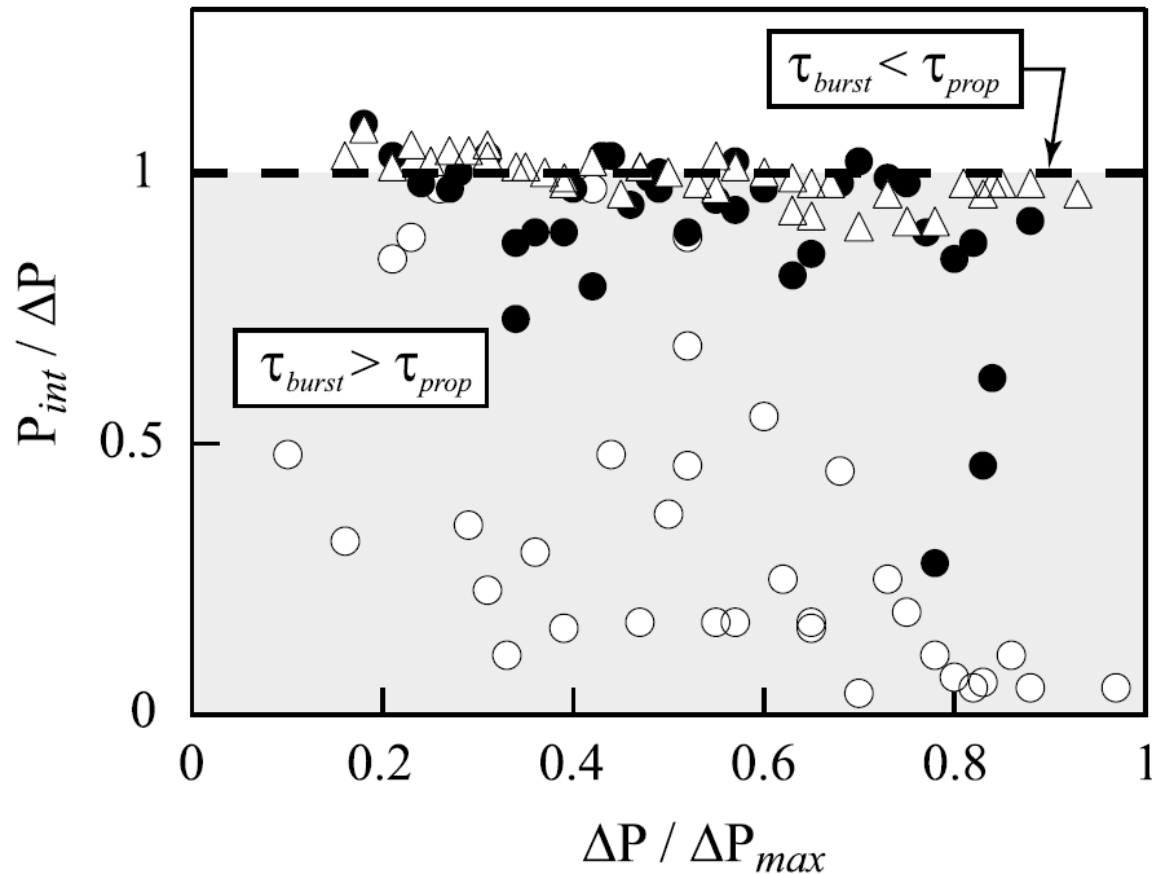


Amplitude du saut de pression

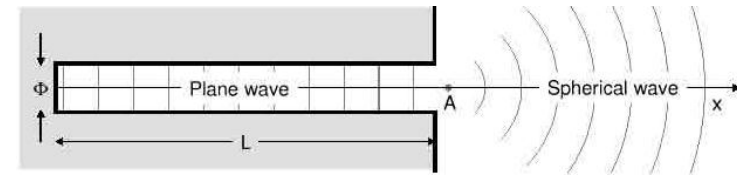


A priori pas reproductible... ?

Amplitude du saut de pression P_{int}



[Symbol, α]: [\circ , 2]; [\bullet , 8]; [\triangle , 23]



Compétition entre deux temps caractéristiques

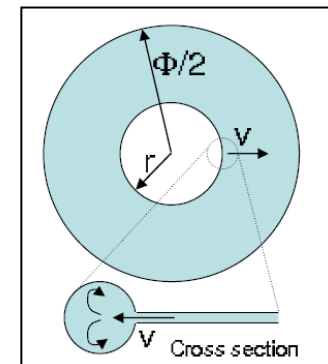
$$\tau_{prop} \sim \frac{2L}{c}$$

propagation de l'onde

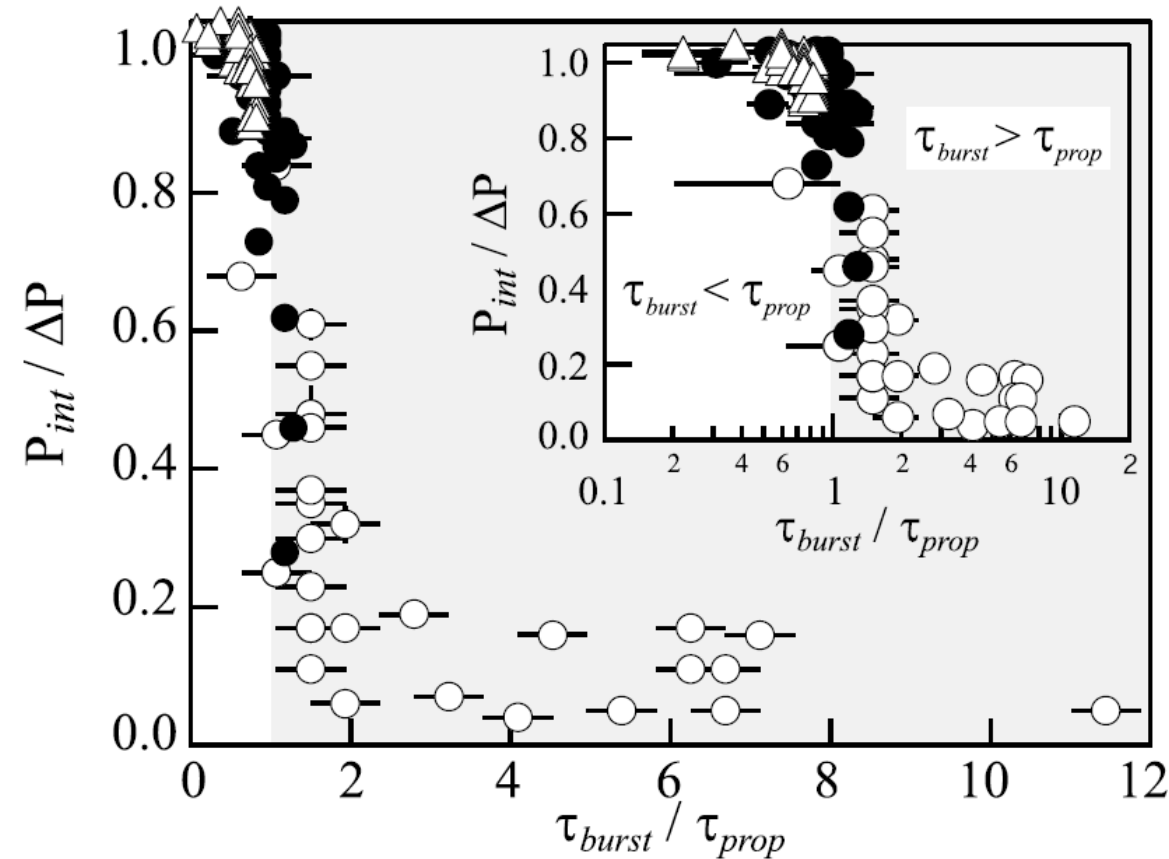
VS

$$\tau_{burst}$$

ouverture du film



Amplitude du saut de pression P_{int}



Compétition entre
deux temps caractéristiques

$$\tau_{prop} \sim \frac{2L}{c}$$

propagation
de l'onde

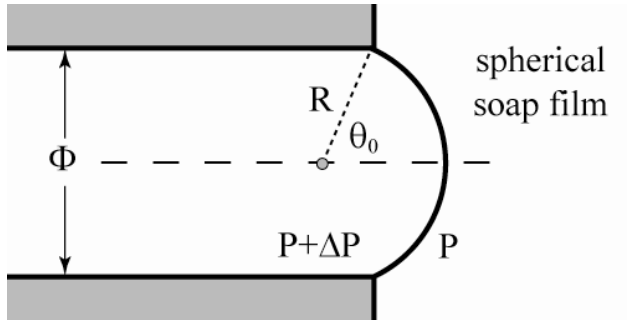
VS

$$\tau_{burst}$$

ouverture
du film

[Symbol, α]: [\circ , 2]; [\bullet , 8]; [\triangle , 23]

Energie transmise à l'extérieur



$$\beta = (1/T_i) E_T^{out} / E_p$$

radiation +
dissipation

effet du temps
de rupture



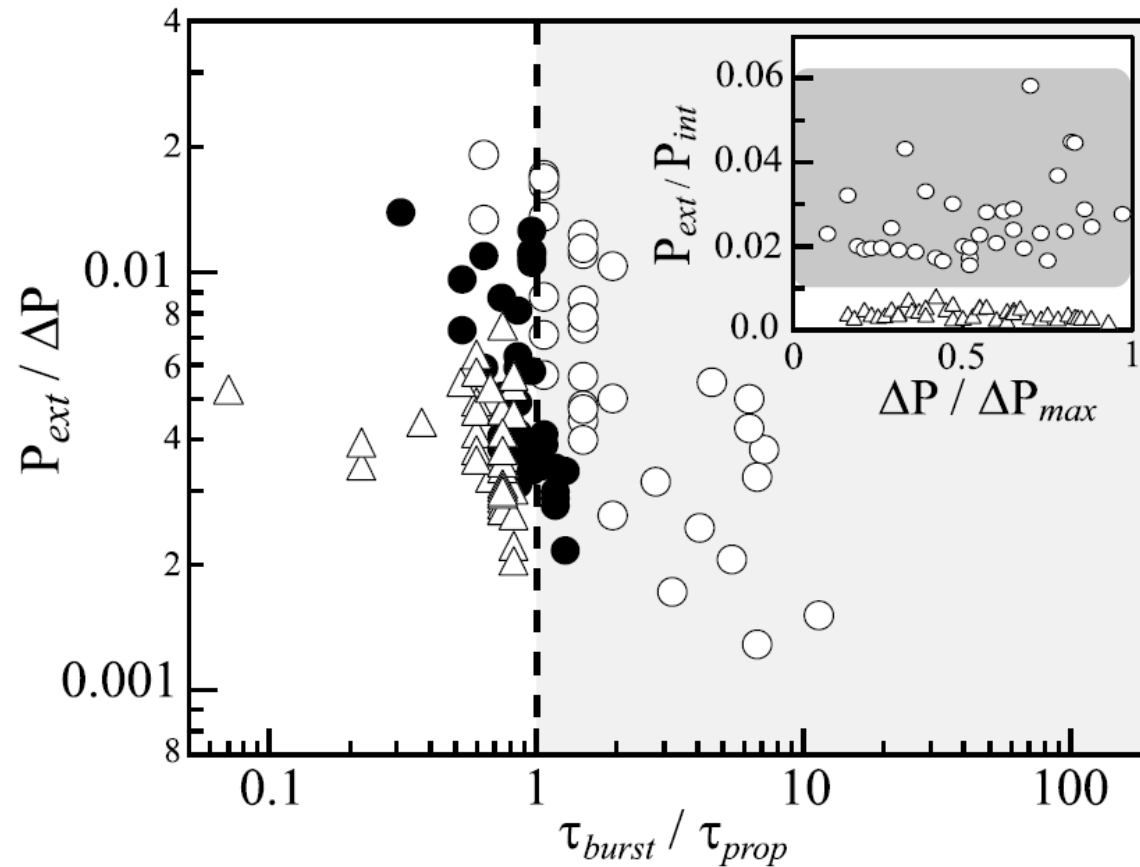
$\beta_e = \beta_\tau \beta_v$ estimé →

β mesuré →

Φ	6 mm	8 mm	10 mm
β_τ	81%	75%	68%
β_v	16%	30%	46%
β_e	13%	22%	31%
β_m	14%	23%	26%

On ne récupère qu'un faible pourcentage de l'énergie initiale !

Amplitude du saut de pression P_{ext}



[Symbol, α]: [\circ ,2]; [\bullet ,8]; [\triangle ,23]

Il est *impossible*,
à partir de la mesure de
la pression extérieure,
de déduire la pression
initiale dans la cavité !

... à retenir !

Modélisation en laboratoire

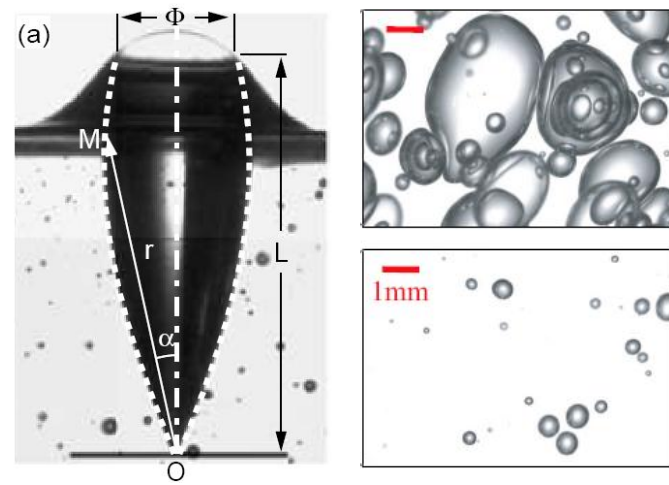
Reproduire l'acoustique des volcans en laboratoire ?

- Acoustique de l'éclatement de bulles

- *Cavité résonante : une bulle « modèle »*

- *Bulle unique en surface d'un fluide*

- *Variations en régime continu*



Quel 'fluide complexe' ?

(1) *Le magma*



lave pahoehoe, Kilauea, Hawai'i

<http://www.science-et-vie.net/> Crédit: Tom Pfeiffer

- le magma est *non-newtonien*
- *à seuil, rhéofluidifiant*

(2) *Un analogue en laboratoire ?*

Quel ‘fluide complexe’ ?

(1) *Le magma*



lave pahoehoe, Kilauea, Hawai'i

<http://www.science-et-vie.net/> Crédit: Tom Pfeiffer

- le magma est *non-newtonien*
- *à seuil, rhéofluidifiant*

(2) *Un analogue en laboratoire ?*

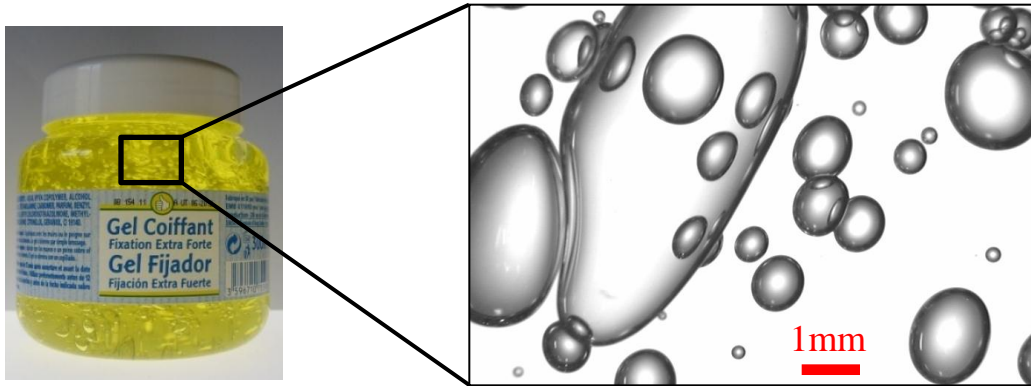


Le gel pour cheveux a les “bonnes” propriétés rhéologiques !

- *Remontée et éclatement de bulles dans un gel*

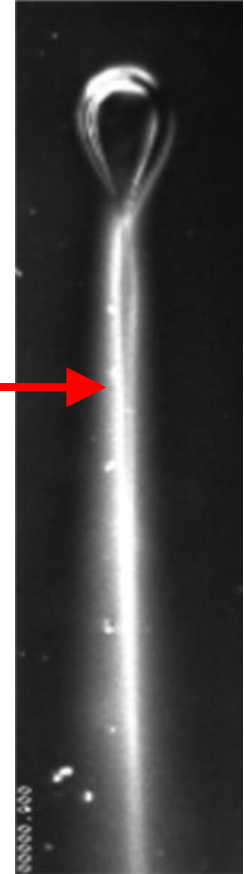
Propriétés rhéologiques (gel)

- Existence d'un seuil (σ_s)



- Rhéofluidifiant

sillage de
viscosité réduite
(rhéofluidifiant)



- Les bulles de rayon $r < r_c$ restent piégées dans le fluide

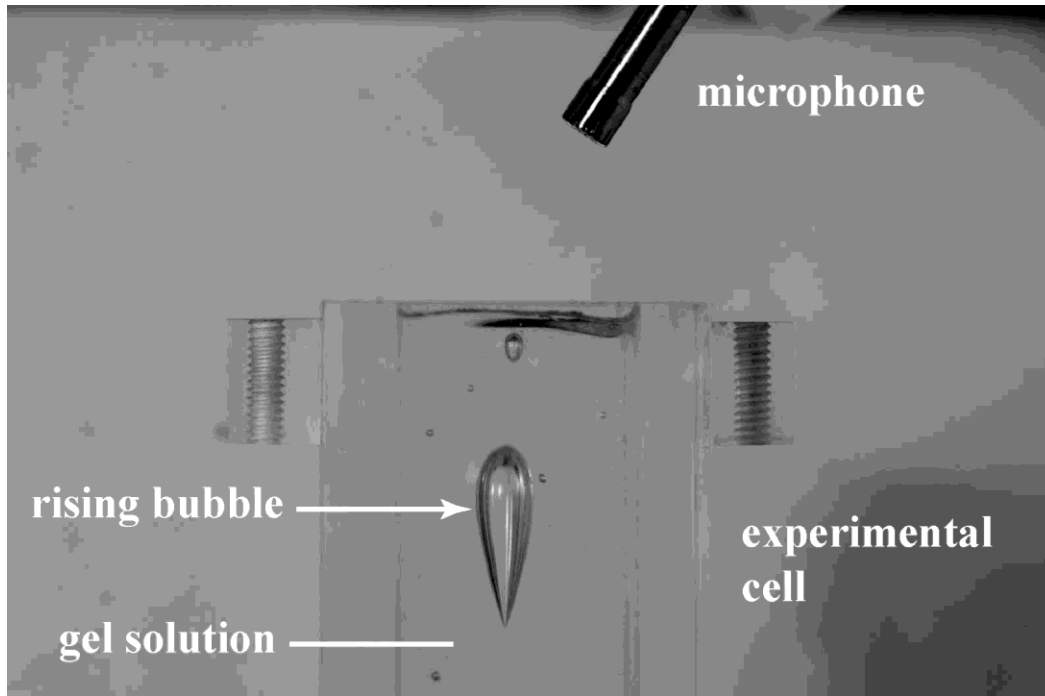
Rayon critique :

$$r_c = \frac{3\sigma_s}{4\Delta\rho g} \quad (\sim \text{mm})$$

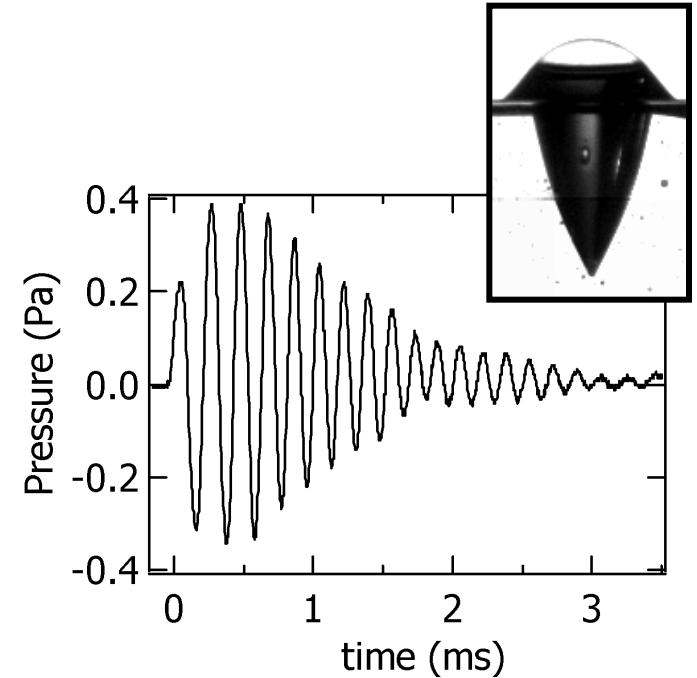
CPCI/NaSal
[Handzy &
Belmonte, 2004]

- formation d'un couloir de viscosité réduite

Acoustique d'une bulle unique



Gel fijador de cabello, for men, Camel White



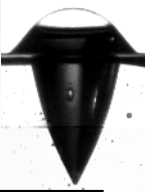
T. Divoux, J.-C. G eminard



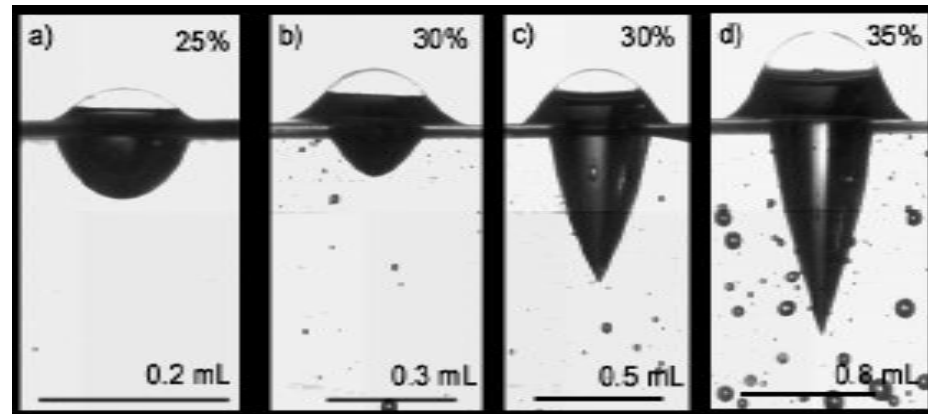
Non-Linear Physics Laboratory,
Universidad de Santiago, Chile

F. Melo

Acoustique d'une bulle unique



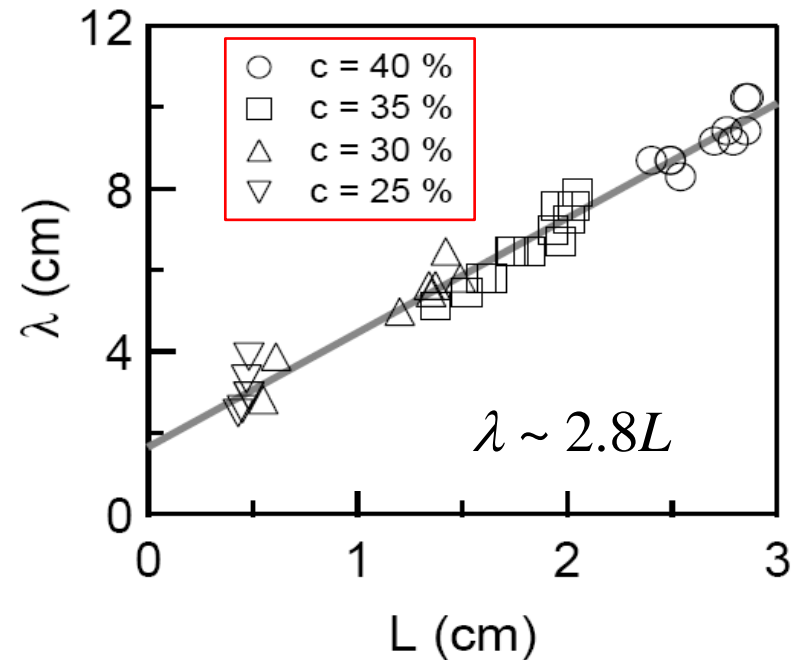
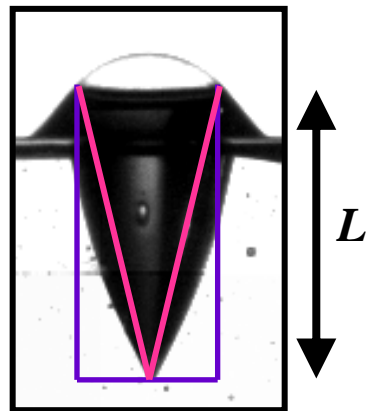
- Différentes formes de bulle



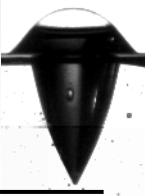
- La bulle se comporte comme un résonateur

cylindre
 $\lambda \sim 4L$

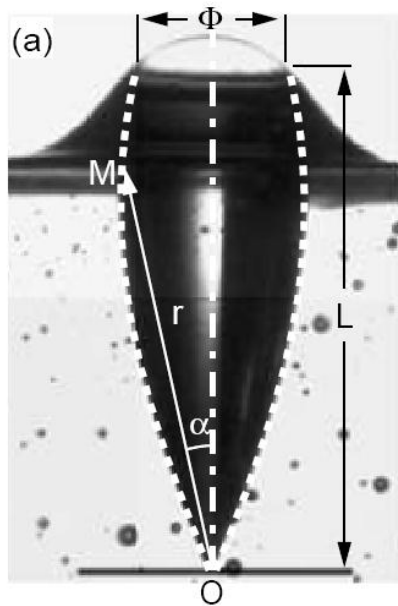
cône
 $\lambda \sim 2L$



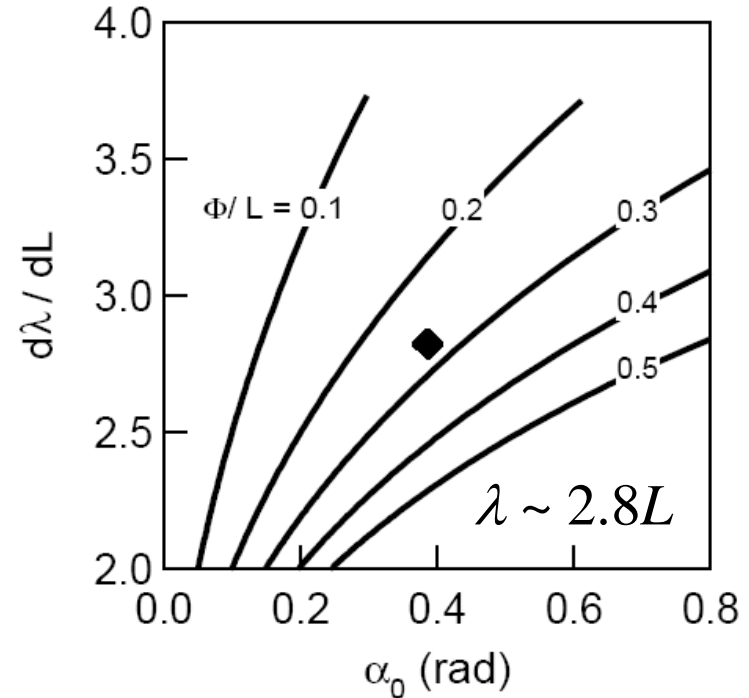
Acoustique d'une bulle unique



- Simulations numériques (forme réelle de la bulle)

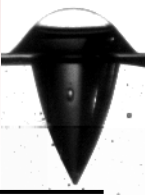


$$\alpha(r) = \alpha_0 \cos(\beta r)$$



$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 P(r, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial P(r, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial P(r, t)}{\partial r} \frac{d}{dr} \log [1 - \cos \alpha(r)]$$

Bilan d'énergie

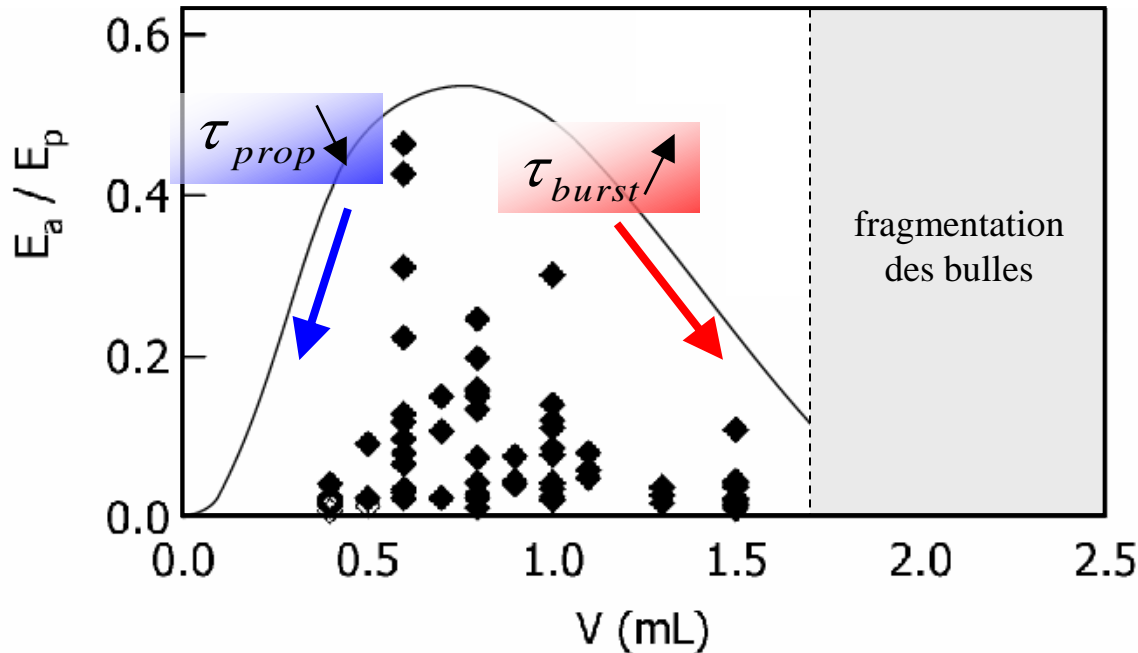


• acoustique

$$E_a \simeq \frac{2\pi d^2}{\rho v} \int_{t=0}^{\infty} P(t)^2 dt$$

• avant éclatement

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{V \delta P^2}{\rho v^2}$$



Compétition entre deux temps caractéristiques

$$\tau_{prop} \sim \frac{2L}{c}$$

propagation de l'onde

VS

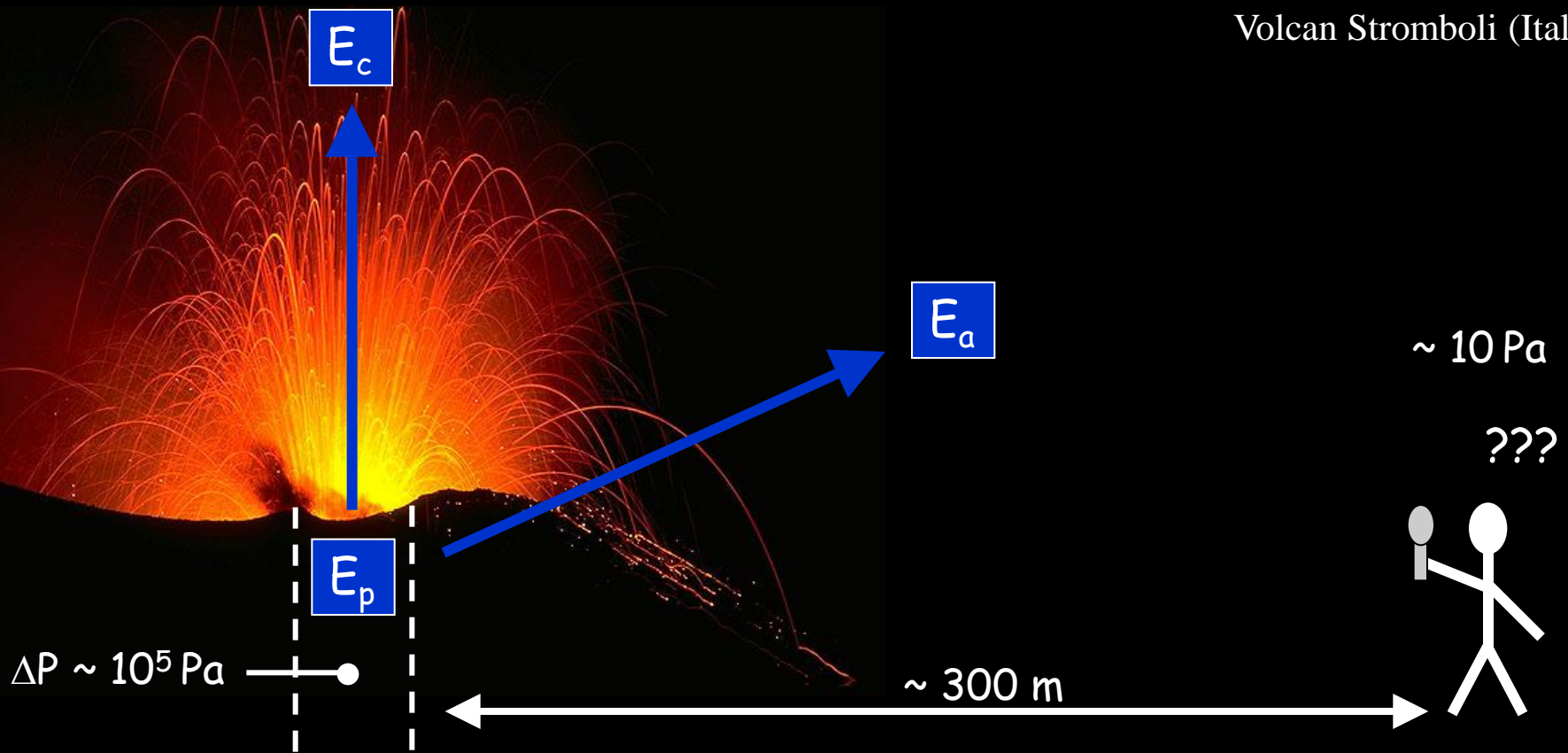
$$\tau_{burst}$$

ouverture du film

➤ La mesure de l'énergie acoustique ne donne **AUCUNE INFORMATION** sur l'énergie initiale stockée dans la bulle (e.g. surpression)

Implications géophysiques ?

Volcan Stromboli (Italie)



Departamento de Geofísica,
Universidad de Chile

D. Legrand (sismologie)

Dipartimento di
Scienze della Terra

Università degli Studi di Firenze

University of Florence (Italy)

M. Ripepe (acoustique)

Modélisation en laboratoire

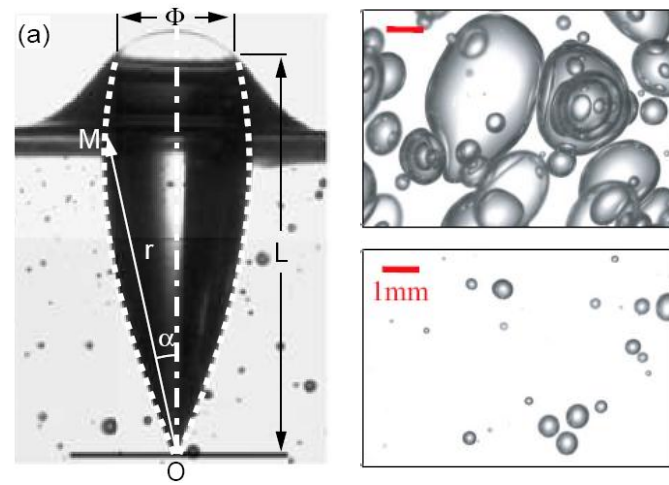
Reproduire l'acoustique des volcans en laboratoire ?

- Acoustique de l'éclatement de bulles

- *Cavité résonante : une bulle « modèle »*

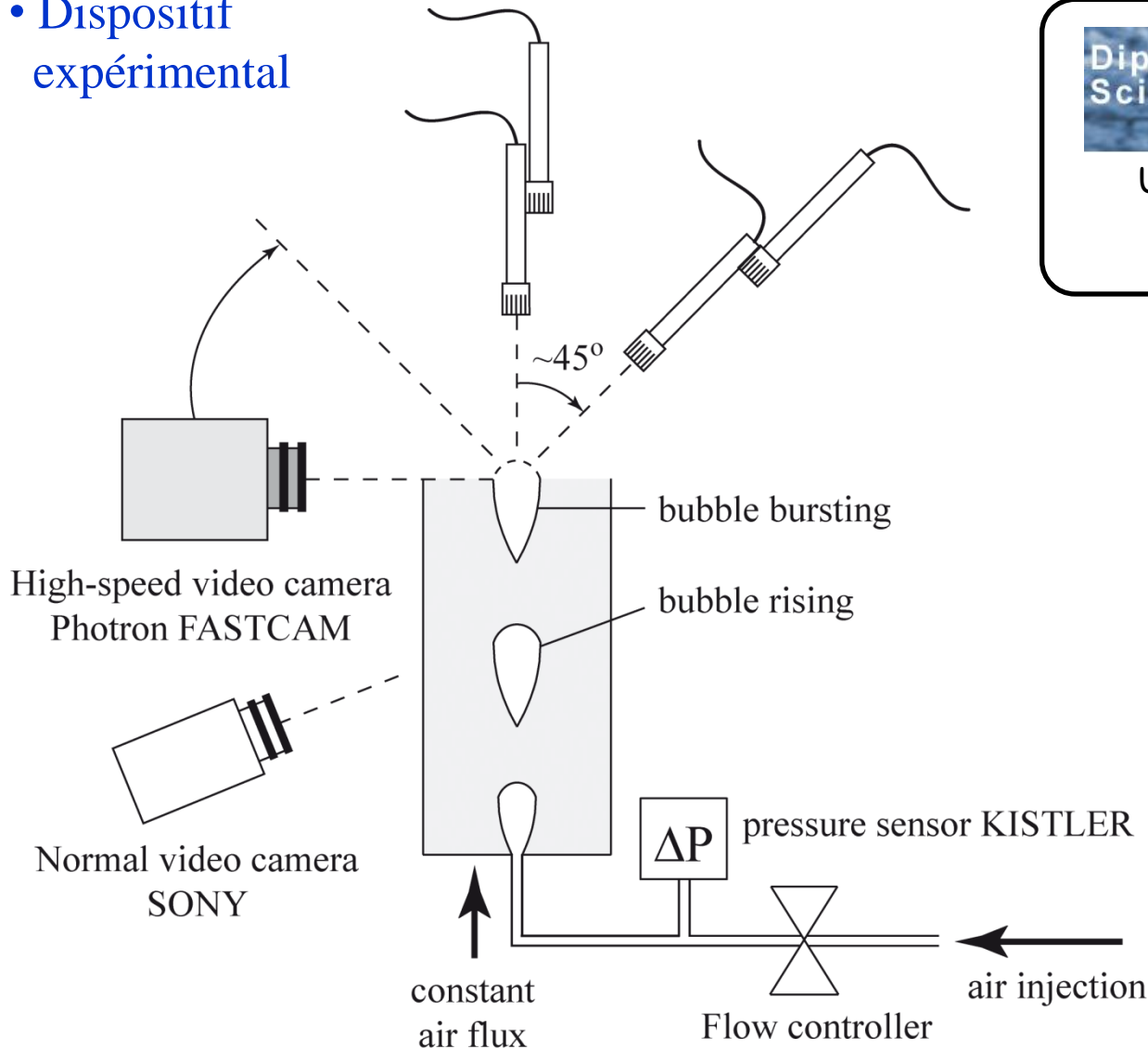
- *Bulle unique en surface d'un fluide*

- *Variations en régime continu*



Variations en régime continu

- Dispositif expérimental



Dipartimento di
Scienze della Terra

Università degli Studi di Firenze

University of Florence (Italy)

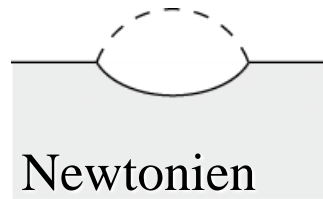
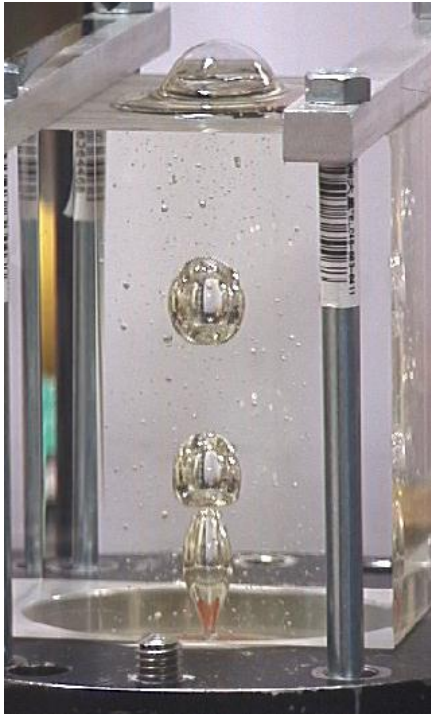
M. Ripepe

Mie Ichihara
Kei Kurita



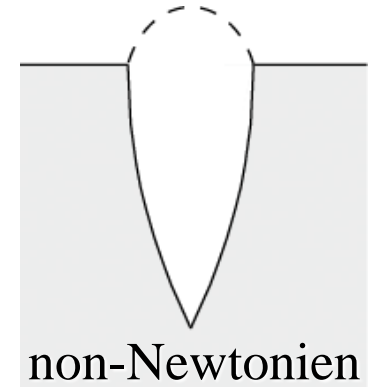
Earthquake Research
Institute (ERI),
University of Tokyo,
Japan

Flux constant – Observations



Newtonien

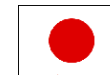
mizuame 90%
(sirop de sucre)



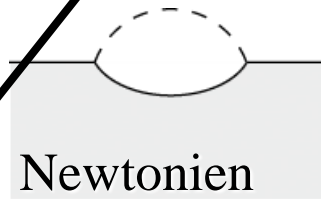
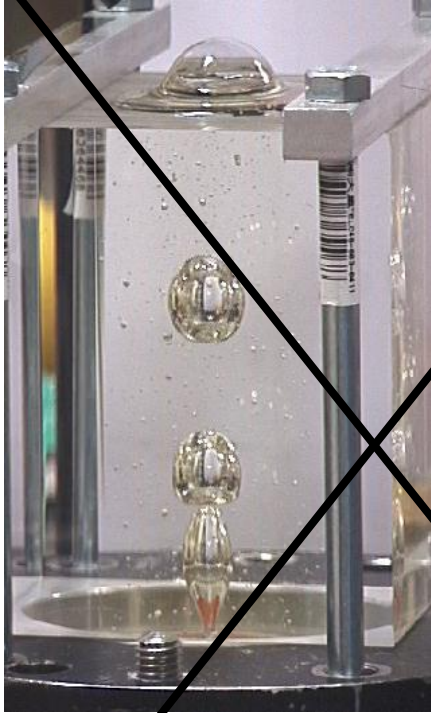
non-Newtonien

*à seuil
rhéofluidifiant*

gel GATSBY
60% vol.

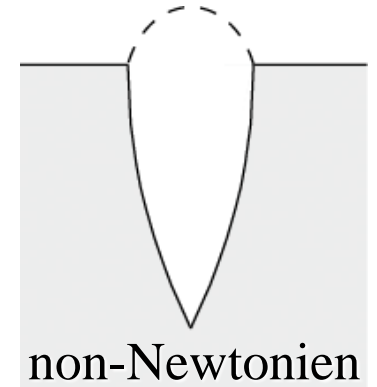
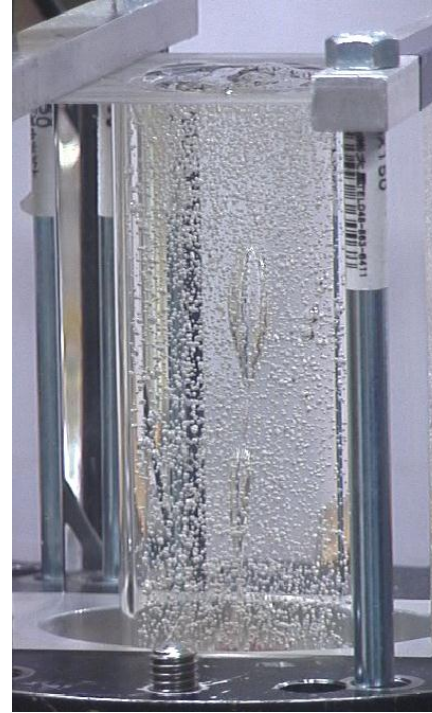


Flux constant – Observations



Newtonien

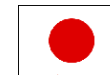
mizuame 90%
(sirop de sucre)



non-Newtonien

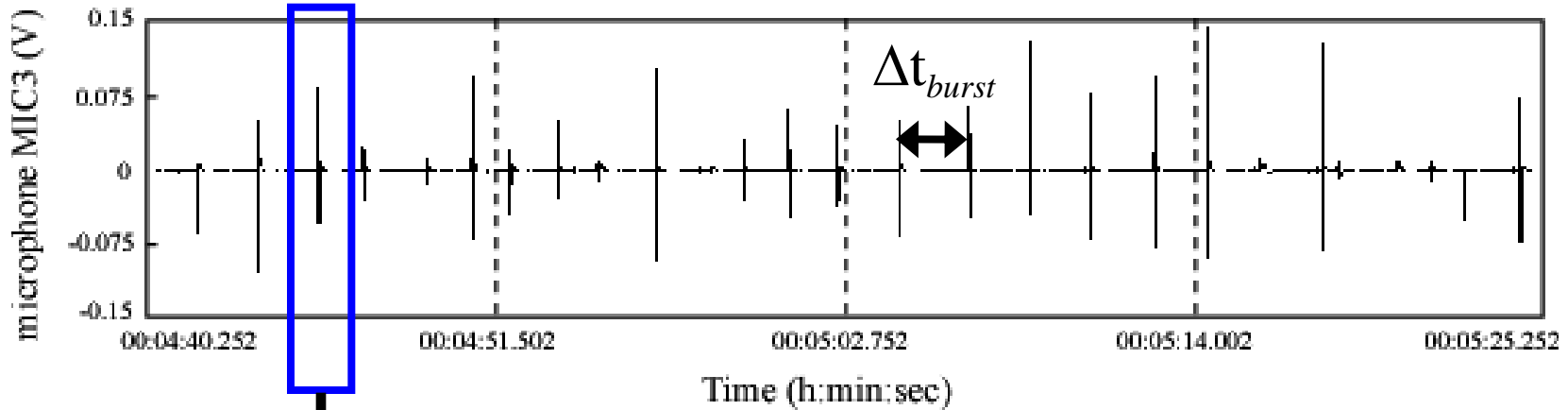
*à seuil
rhéofluidifiant*

gel GATSBY
60% vol.



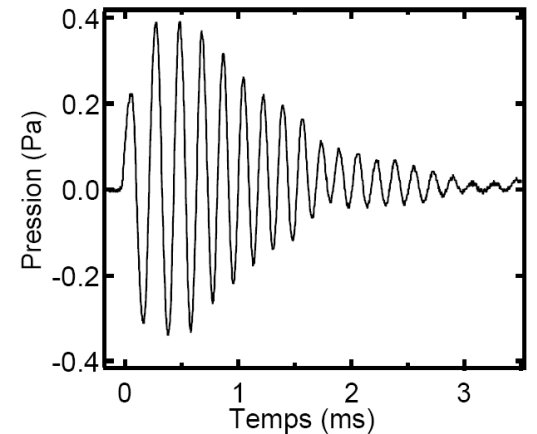
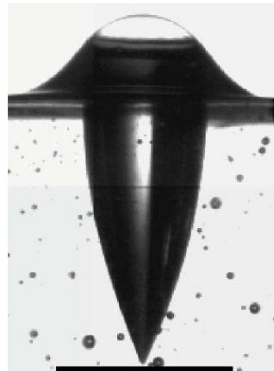
Condition initiale : gel avec bulles piégées

Forme d'onde acoustique



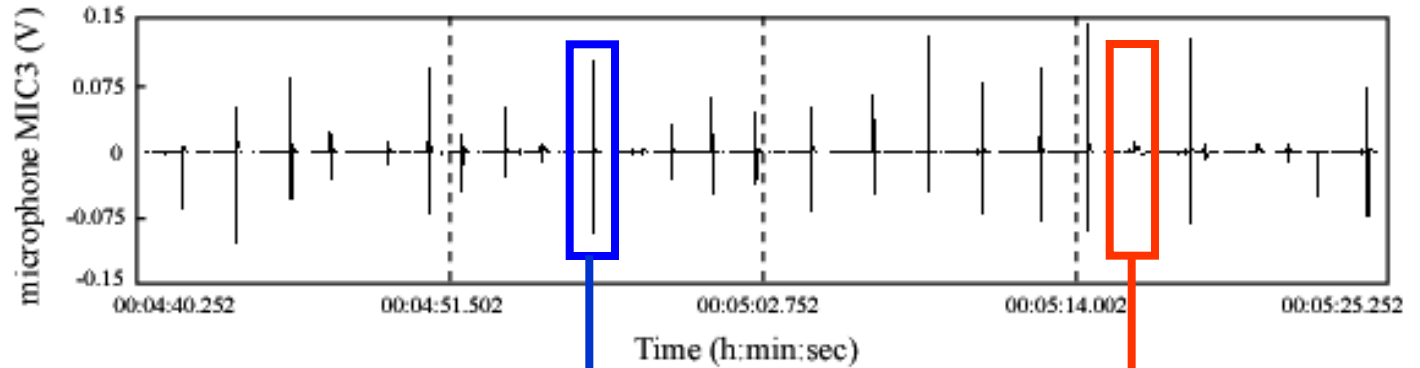
Forme d'onde
acoustique
en régime continu ?

Bulle unique

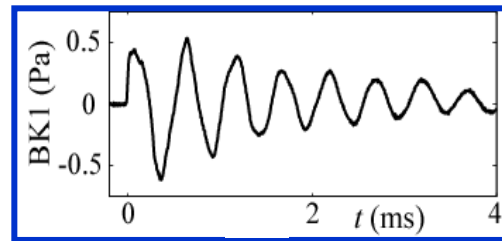


Forme d'onde acoustique

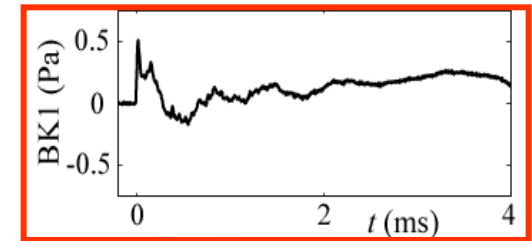
Forme d'onde acoustique



Différents types de forme d'onde

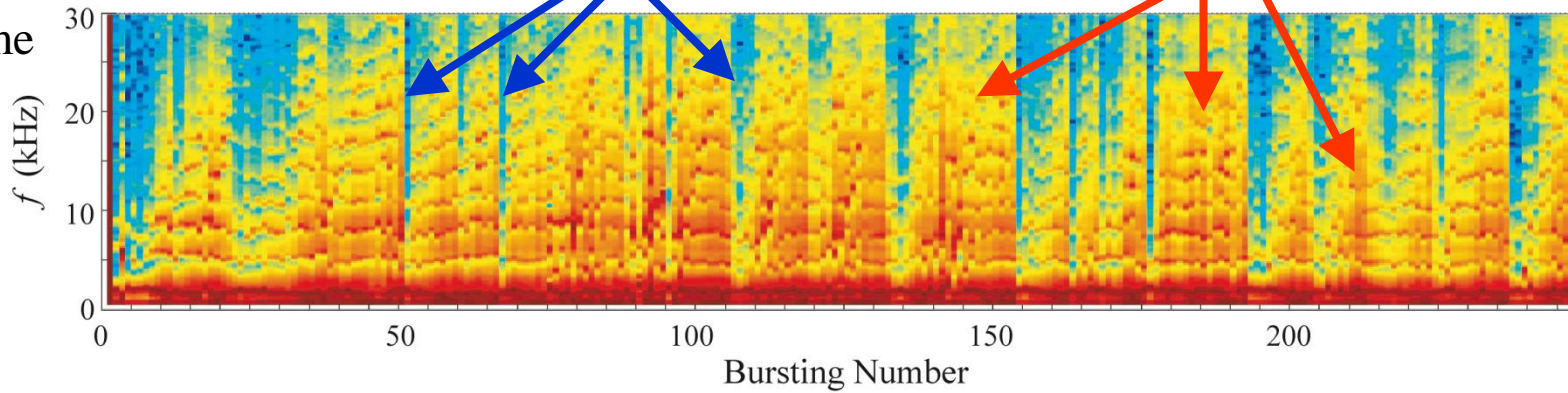


'RESONANCE'



'BLAST'

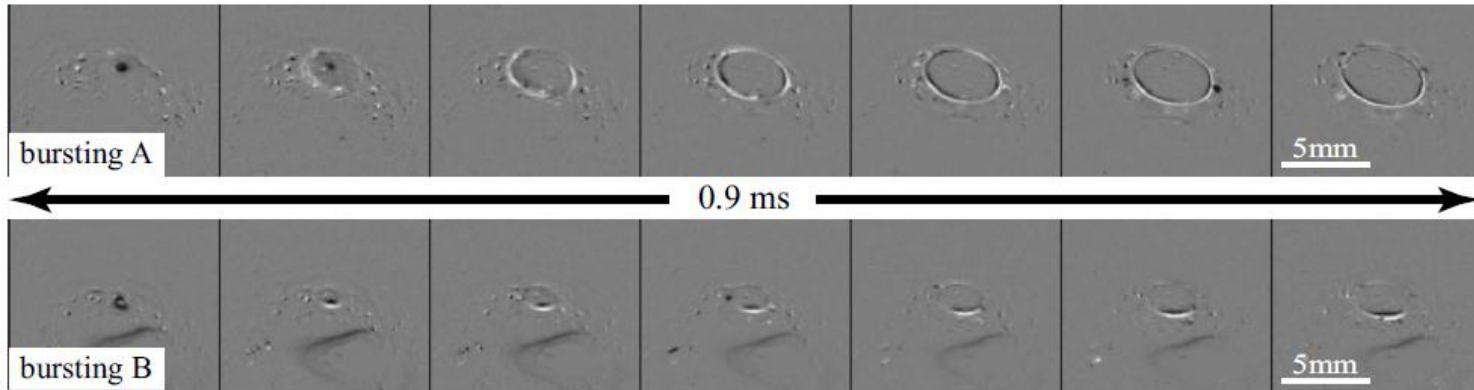
Spectrogramme



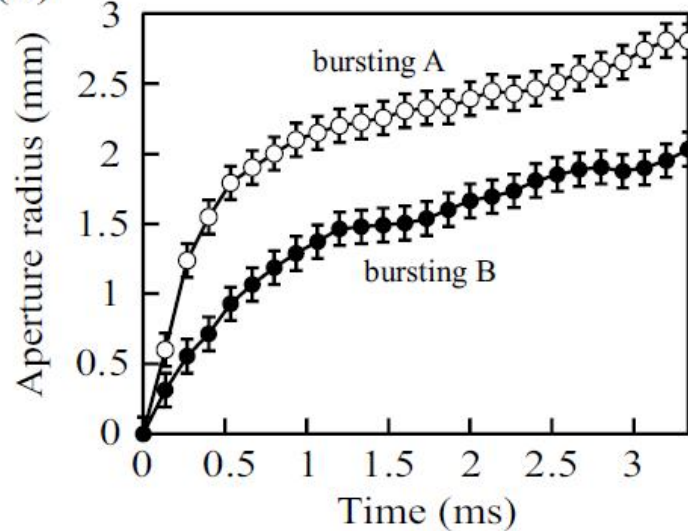
Forme d'onde acoustique

- Lien avec le temps d'ouverture du film

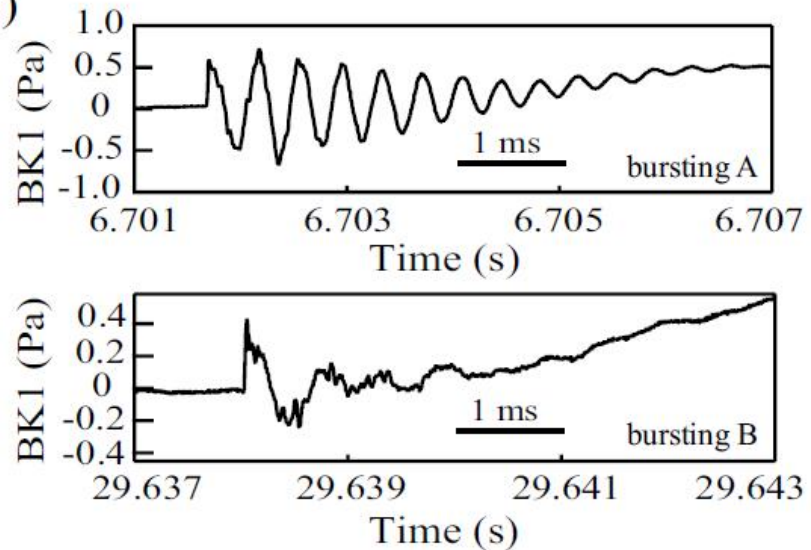
(a)



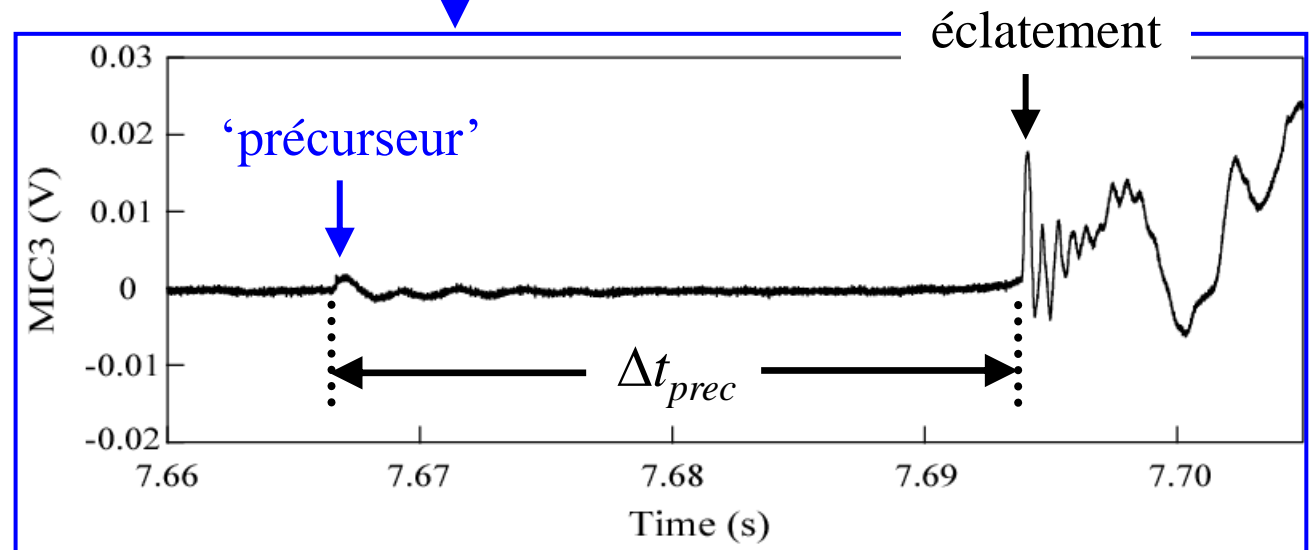
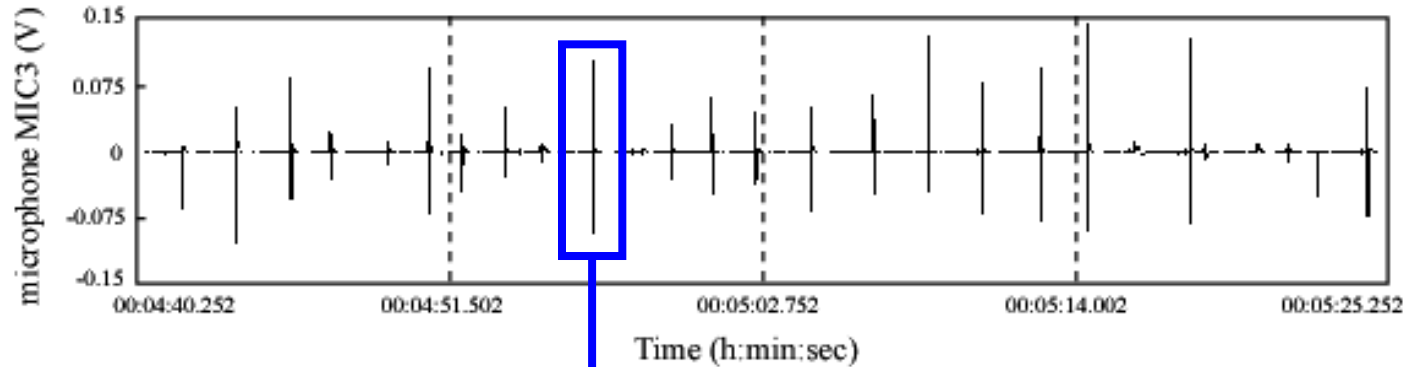
(b)



(c)



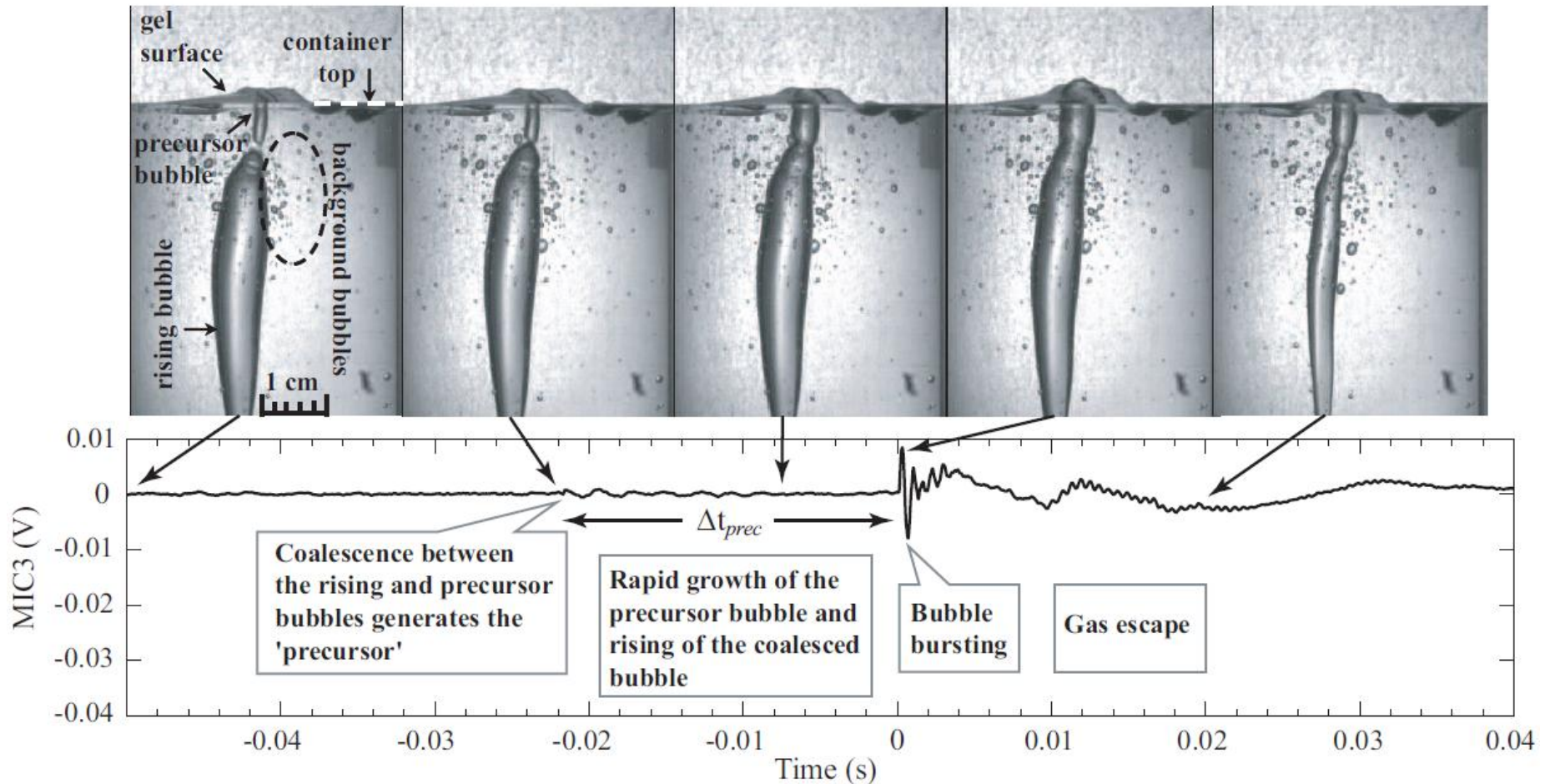
Forme d'onde acoustique



➤ *Existence d'un signal précurseur*

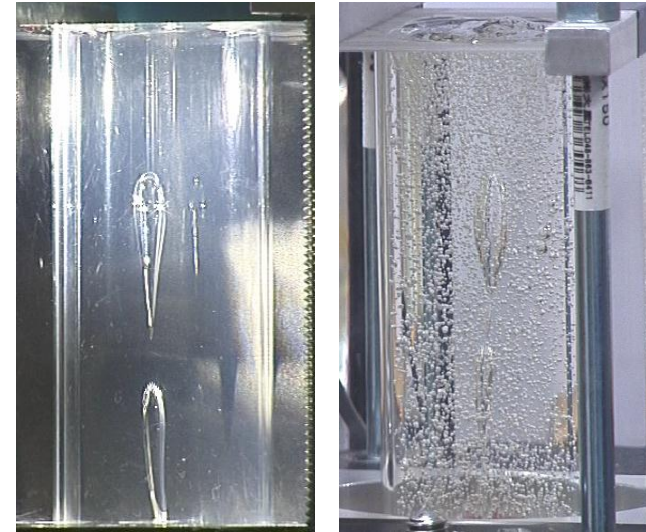
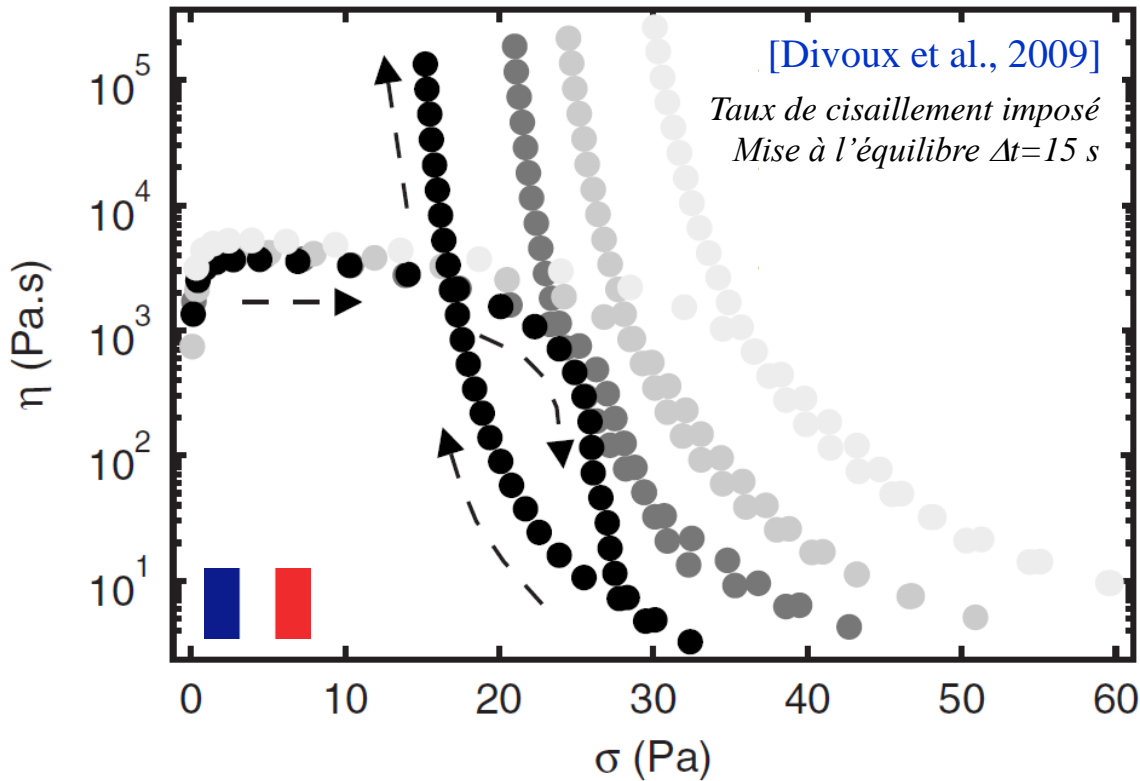
Signal précurseur

- Origine du signal précurseur : coalescence avec une bulle ‘satellite’



Origine de la modulation ?

- Effet des bulles ‘satellites’

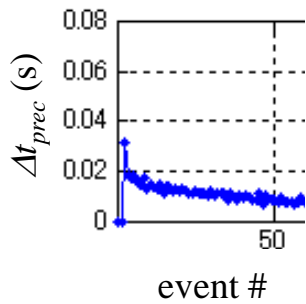
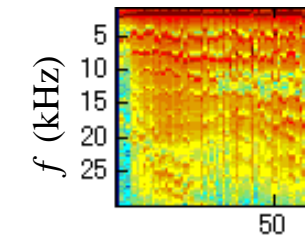


- σ_c diminue
- η diminue
- augmentation de l'effet mémoire

➤ *Modification de la rhéologie*

Origine de la modulation ?

- Effet des bulles ‘satellites’



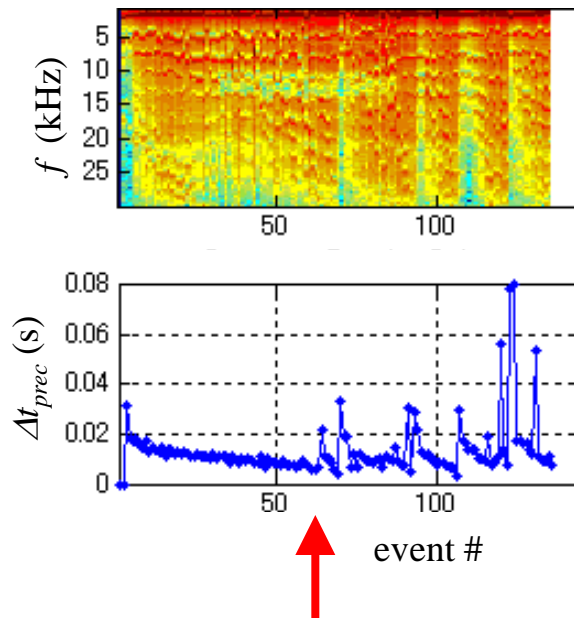
pas de
modulation !

gel initial sans bulles



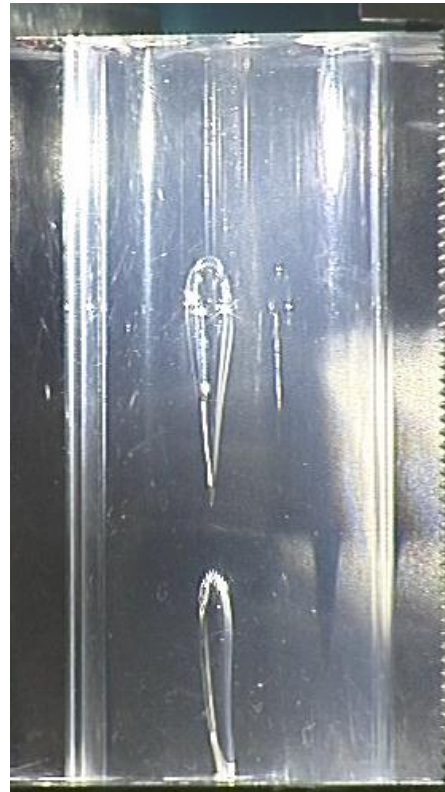
Origine de la modulation ?

- Effet des bulles ‘satellites’

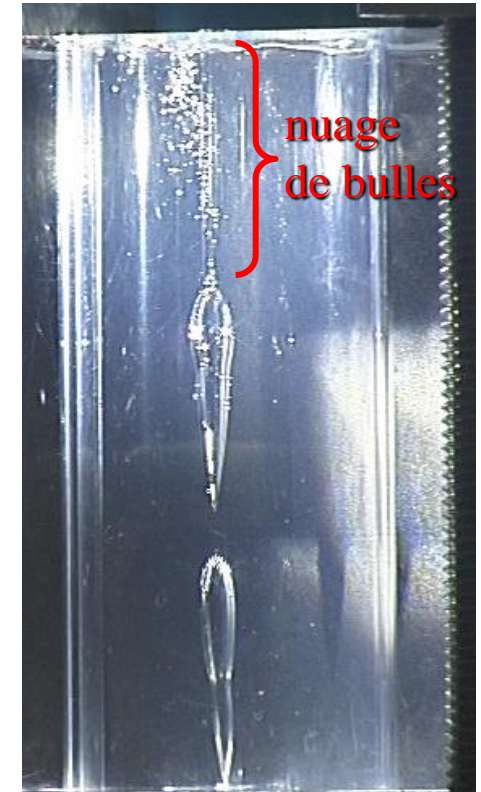


↑
début de la
modulation

gel initial sans bulles



formation & interaction

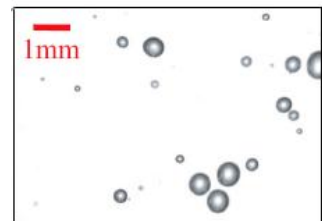
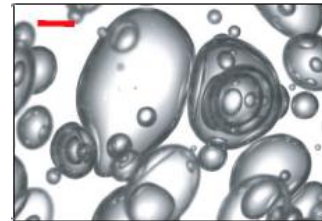
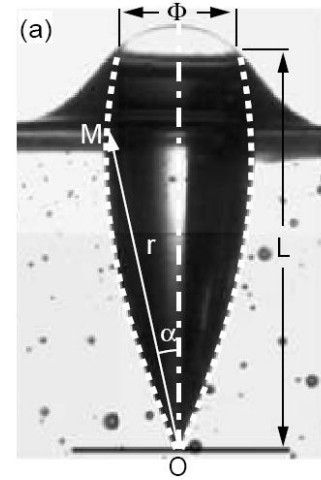


➤ *Importance de la rhéologie*

Conclusion sur les expériences

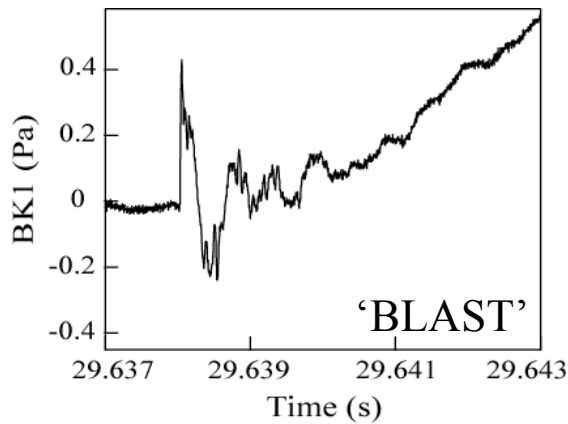
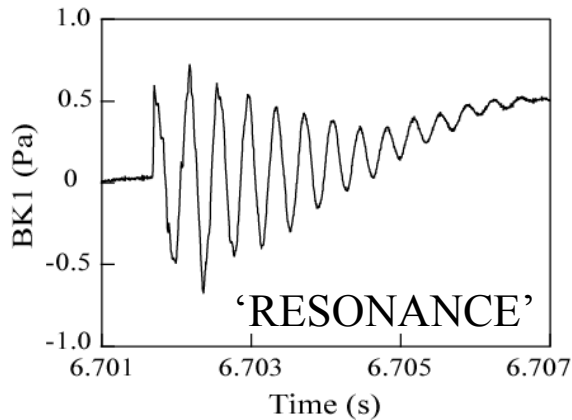
Reproduire l'acoustique des volcans en laboratoire ?

- La bulle agit comme un résonateur
- L'énergie acoustique émise dépend du temps d'ouverture
 - *on ne peut rien en déduire sur l'énergie initiale*
- Modulation de la forme d'onde en régime continu :
 - *résonance / 'blast'*
- Existence d'un signal précurseur



Quid de la forme d'onde ?

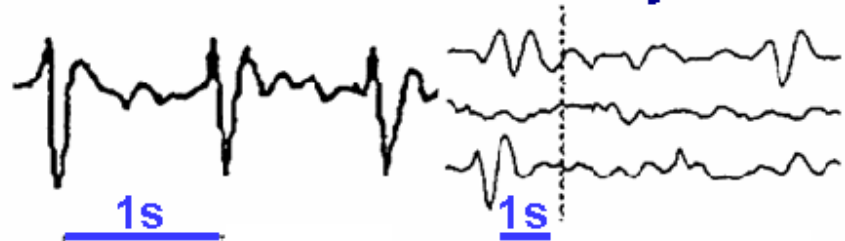
Expériences



Volcans

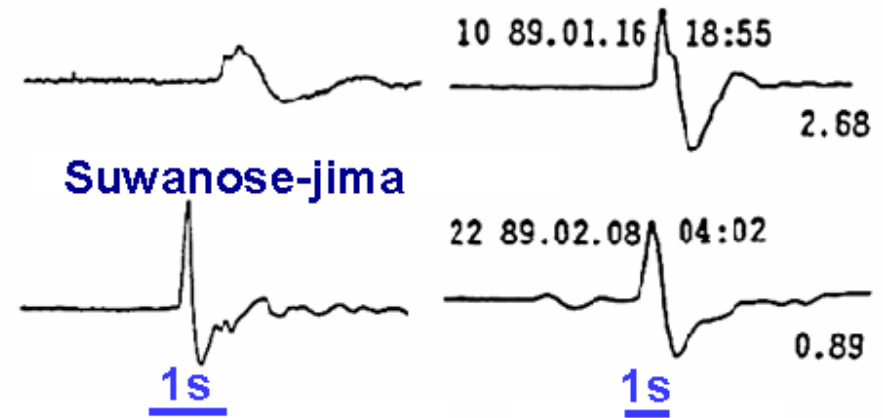
Stromboli

Mayon



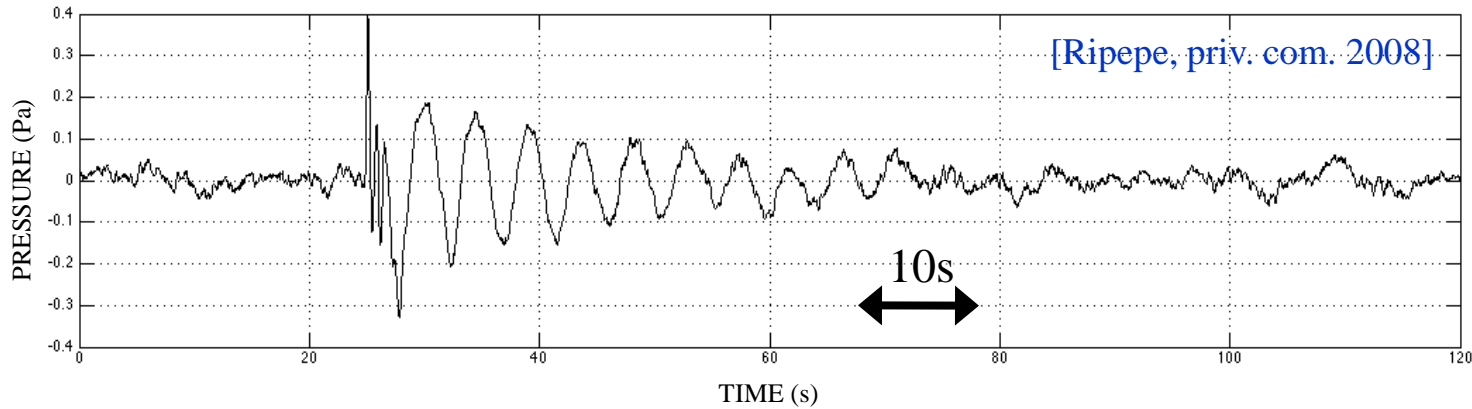
Sakura-jima

Tokachi-dake



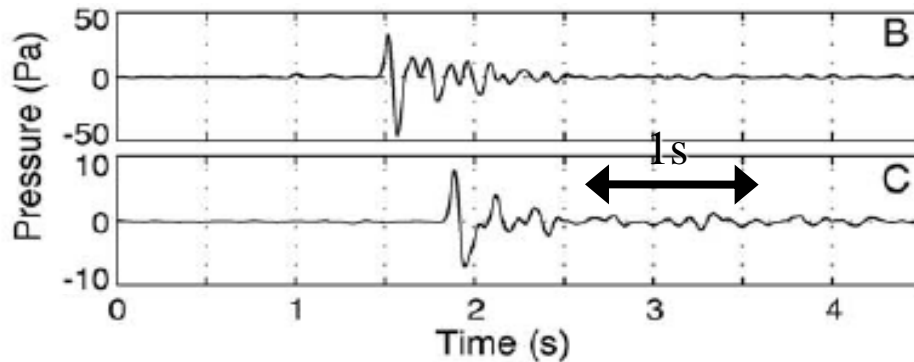
[Taniguchi et al., 1999]

Quid de la forme d'onde ?

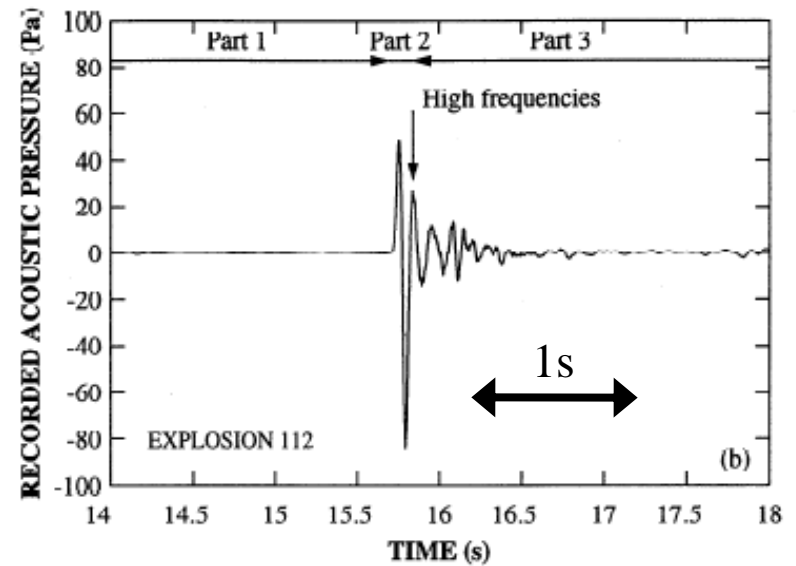


ETNA
(Italie)

STROMBOLI (Italie)



[Ripepe & Marchetti, 2002]



[Vergniolle & Brandeis, 1996]

Retour aux phénomènes naturels

- Que manque-t-il pour une application quantitative ?

- une mise à l'échelle...

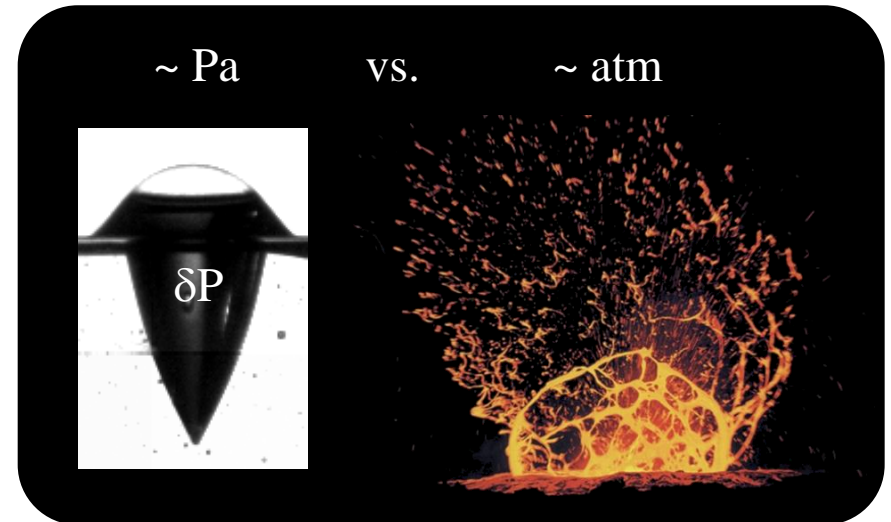
...mais pas seulement

- exploration des limites des processus physiques...

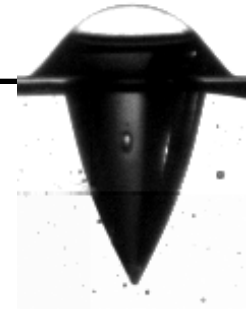
... et au-delà

- prise en compte d'autres processus physiques afin de rendre l'expérience plus proche du cas réel

(gradient de P , T , transition de phase, etc.)



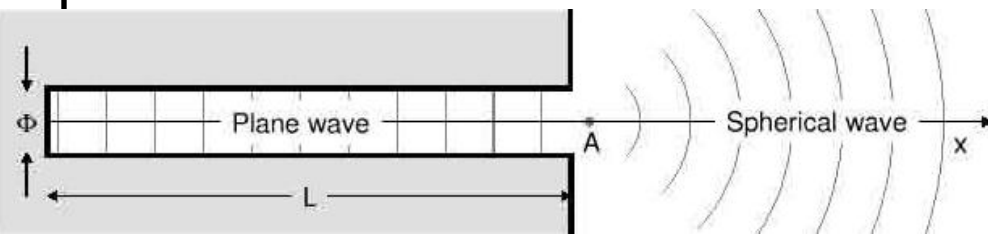
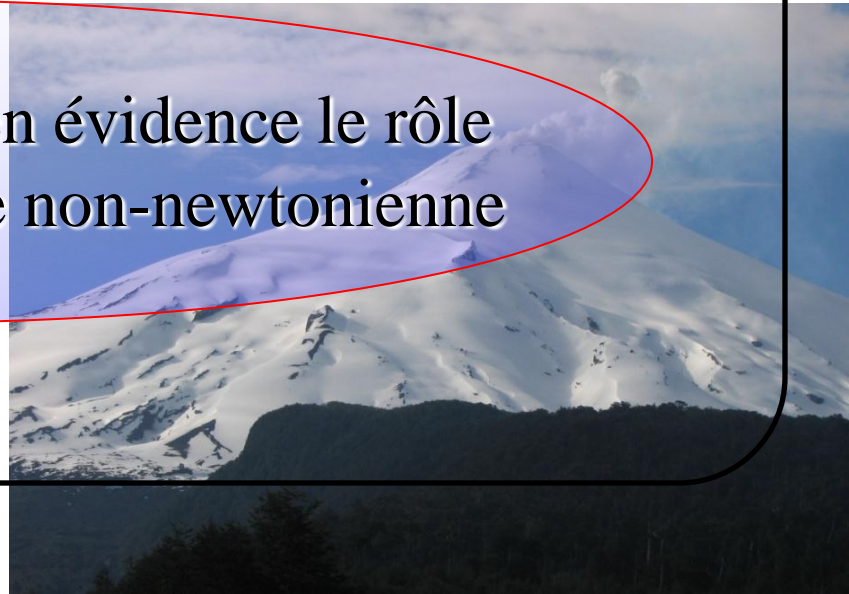
Conclusion



Acoustique }

des expériences simples, mais
des mécanismes complexes

Les expériences mettent en évidence le rôle
primordial de la rhéologie non-newtonienne



Remerciements



Jean-Christophe
Géminard



Thibaut Divoux

Francisco
Melo



Non-Linear Physics
Laboratory, Univ.
Santiago, Chili

Departamento
de Geofísica,
Universidad
de Chile



Denis
Legrand

Dipartimento di
Scienze della Terra



Università degli Studi di Firenze



Università degli
Studi di Firenze,
Italie

Maurizio Ripepe



Mie Ichihara



Kei Kurita



Earthquake Research
Institute (ERI),
Univ. Tokyo, Japon