



PHS 4700
Physique pour les applications multimédia

Chapitre 7 — Milieux continus et ondes

G. Marleau

Automne 2016

Table des matières

Les fluides
Simulations numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Les fluides
Simulations numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Les fluides

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Les fluides sont des milieux matériels parfaitement déformables.
On regroupe sous cette appellation :

- les gaz, qui sont des fluides compressibles ;
- les liquides, qui sont des fluides peu compressibles.

Dans certaines conditions (hautes températures et pressions), le milieu n'est ni liquide ni gazeux, il reste cependant un fluide (fluide supercritique).

Les fluides

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Les fluides sont constitués de molécules qui ne sont pas reliées fortement entre elles par les forces moléculaires.

- Ces molécules, si elles sont peu concentrées dans le milieu, interagissent très peu entre elles (principalement par collision). Ce sont les gaz.
- Elles peuvent aussi interagir plus fortement par l'intermédiaire de forces de van der Waals et des interactions dipolaires. Ce sont les liquides.

Ce sont ces interactions qui expliquent les propriétés physiques et chimiques des gaz et des liquides.

La dynamique des fluides.

- C'est l'étude du mouvement des fluides, qu'ils soient en phase liquide ou gazeuse.
- Elle fait partie de la mécanique des fluides avec l'hydrostatique (statique des fluides).
- La résolution d'un problème de dynamique des fluides demande normalement de calculer diverses propriétés des fluides par exemple la vitesse, la pression, la densité et la température en tant que fonctions de l'espace et du temps.

Les fluides

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Les axiomes fondamentaux de la dynamique des fluides sont des lois de conservation :
 - ◆ la conservation des masses ;
 - ◆ la conservation de la quantité de mouvement ;
 - ◆ la conservation de l'énergie.
- Les équations différentielles non linéaires qui résultent de ces lois de conservation décrivent le mouvement des fluides.

Les fluides

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Ces équations n'ont généralement pas de solutions analytiques et ne sont donc utiles que pour des simulations numériques.
- Ces équations peuvent cependant être simplifiées en utilisant différentes approximations de façon à les rendre plus faciles à résoudre. Des exemples sont :
 - ◆ les équations pour les ondes de pression dans les gaz (ce qui est perçu comme un son) ;
 - ◆ les équations pour les ondes à la surface des liquides (les vagues).

Comportement des fluides.

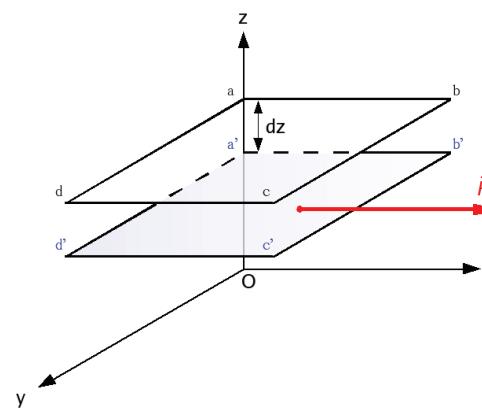
- Ce sont les équations de Navier-Stokes qui gouvernent le comportement des fluides.
- Malgré leur relative simplicité, ces équations peuvent générer des comportements extrêmement complexes, comme la turbulence.
- Comme il est difficile d'aborder facilement des phénomènes chaotiques tels la turbulence en utilisant des équations déterministes, on considère souvent le comportement du fluide d'un point de vue statistique (la physique statistique), mais les phénomènes, telle la turbulence, restent tout de même difficiles à prédire.
- Le problème est que la majorité des fluides (eau, air) ont un comportement turbulent dans la vie de tous les jours (écoulement d'une rivière, vent, etc.).

Viscosité.

- L'interaction entre les molécules dans un gaz ou dans un liquide donne naissance au concept de viscosité.
- La viscosité représente la résistance qu'offre un fluide à des forces de déformation.
- Pour un gaz, c'est principalement l'échange de quantité de mouvement entre différentes couches de gaz qui donne naissance à la viscosité.
- Pour un liquide, les mécanismes exacts à la source de la viscosité ne sont pas encore complètement compris.

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
 Effet Doppler
 Ondes de surface
 Conclusions

Définition de la viscosité.



Force de frottement qui s'oppose au glissement d'un plan sur un autre.

$$\vec{F} = \eta S \frac{d\vec{v}}{dx}$$

Équations de Navier-Stokes.

- Elles représentent des équations de bilan (énergie, masse et quantité de mouvement).
- Elles peuvent prendre plusieurs formes, tout dépendant du point de vue que l'on adopte :
 - ◆ pour suivre les particules du fluide, on utilise la description lagrangienne ;
 - ◆ si l'on veut considérer un point fixe dans l'espace, on utilise la description eulérienne.

Paramètres importants des équations de Navier-Stokes :

- t est le temps ;
- ρ est la masse volumique du fluide ;
- \vec{v} est la vitesse d'une particule du fluide ;
- p la pression.
- \vec{f} est la force massique s'exerçant dans le fluide et peut correspondre à la force gravitationnelle, électromagnétique, etc. ;
- e est l'énergie par unité de masse que l'on décompose en une composante cinétique e_c et une composante interne (potentielle) e_p

$$e = e_c + e_p = \frac{v^2}{2} + e_p$$

Forme différentielle des équations de Navier-Stokes (formulation Eulérienne).

- Équation de conservation de la masse (de continuité)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

- Équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\tau} \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{q} + \vec{r})$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = - \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \boldsymbol{\tau} + \rho \vec{f}$$

Les fluides

Les fluides
Simulations numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Lorsqu'il y a des échanges thermiques entre les molécules du fluide et l'environnement il faut tenir compte de :

- \vec{q} , le flux de chaleur perdu par conduction thermique ;
- \vec{r} , la perte de chaleur volumique due au rayonnement.

Si le fluide est visqueux, il faut aussi inclure la force de résistance due à la déformation du fluide \vec{F}

$$\vec{F} = \vec{\nabla} \boldsymbol{\tau}$$

avec $\boldsymbol{\tau}$ le tenseur des contraintes visqueuses.

Les fluides

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Les fluides sont classés selon les différentes approximations utilisées pour simplifier les équations de Navier-Stokes :

- fluide newtonien ;
- fluide newtonien compressible (un gaz) ;
- fluide newtonien incompressible (un liquide) et approximation de Boussinesq.

Fluide newtonien.

- En première approximation, le tenseur des contraintes visqueuses est proportionnel à la partie symétrique du tenseur des taux de déformation

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[(\vec{\nabla} \otimes \vec{v}) + (\vec{\nabla} \otimes \vec{v})^t \right] + \eta (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \mathbf{I}$$

avec $3\eta + 2\mu = 0$.

- μ est la viscosité dynamique et η la viscosité de volume du fluide.
- I désigne le tenseur unité.

Les fluides

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Le flux de chaleur est aussi proportionnel au gradient de la température

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T$$

avec λ la conductivité thermique du fluide et T sa température.

- Fonctionne très bien pour de nombreux fluides comme l'eau et l'air.
- Cependant, des fluides comme le miel et la pâte dentifrice ne sont pas newtoniens.

Fluides compressibles.

- Un fluide est dit compressible lorsqu'on ne peut négliger ses variations de masse volumique au cours du temps.
- Dans ce cas on décrit le système à l'aide d'une équation d'état du fluide : $f(p, \rho, T) = 0$.
- Pour un gaz parfait, cette équation d'état s'écrit

$$f(p, \rho, T) = p - \rho \frac{R}{M} T = 0$$

avec $R = 8.314 \text{ J/(K mol)}$, ρ la masse volumique du gaz et M sa masse molaire.

Fluides incompressibles (approximation de Boussinesq).

- Pour un fluide visqueux newtonien incompressible, l'équation de l'énergie est découplée des équations de continuité et de quantité de mouvement.
- On peut alors déterminer la vitesse et la pression du fluide indépendamment de son énergie.
- Les équations de continuité et de quantité de mouvement sont alors considérablement simplifiées

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}$$

avec $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique du fluide.

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

En général, il est impossible de résoudre analytiquement les équations de Navier-Stokes. Il faut donc avoir recours à des solutions numériques. Les principales méthodes utilisées pour la dépendance spatiale des équations sont :

- méthodes des différences finies ;
- méthode des volumes finis ;
- méthodes des éléments finis.

Pour la dépendance temporelle, on utilise encore la méthode d'Euler ou de Runge-Kutta (équivalent aux différences finies dans le temps) .

Méthodes des différences finies.

La solution consiste à :

- diviser le problème en une série de N intervalles de largeur $h = (x_f - x_0)/N$ (aussi en y et z) ;
- remplacer les dérivées par des différences ;
- résoudre de point en point en utilisant les conditions initiales ou aux frontières.

Méthodes des différences finies.

La solution consiste à :

- diviser le problème en une série de N intervalles de largeur $h = (x_f - x_0)/N$;
- remplacer les dérivées par des différences ;
- résoudre de point en point en utilisant les conditions initiales ou aux frontières.

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Remplacement des dérivées par des différences.

■ On utilise une expansion en série de Taylor limitée à l'ordre I :

◆ expansion vers l'avant

$$f(x+h) = f(x) + \sum_{i=1}^I \frac{f^{(i)}(x)}{i!} h^i$$

◆ expansion vers l'arrière

$$f(x-h) = f(x) + \sum_{i=1}^I \frac{f^{(i)}(x)}{i!} (-h)^i$$

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Les dérivées premières sont alors remplacées par :

- différences finies avant d'ordre 1 (expansion avant avec $I = 1$)

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h} + O(h)$$

- différences finies centrées d'ordre 2 (expansions avant et arrière avec $I = 1$)

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} + O(h^2)$$

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Les dérivées secondes sont remplacées par :

- différences avant d'ordre 1 (expansions avant avec $I = 2$)

$$f''(x) \approx \frac{f(x+2h) - 2f(x+h) + f(x)}{h^2} + O(h)$$

- différences finies centrées d'ordre 2 (expansions avant et arrière avec $I = 2$)

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} + O(h^2)$$

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Exemple :

- considérons l'équation

$$\frac{df(x)}{dx} = \rho(x)$$

avec $f(x_0)$ connu.

- on suppose ici la fonction $\rho(x)$ connue à tout point dans l'espace ;

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- on définit les points x_i tels que

$$x_i = \begin{cases} x_0 & \text{si } i = 0 \\ x_{i-1} + h & \text{si } 0 < i < N \\ x_f & \text{si } i = N \end{cases}$$

- si on utilise des différences avant d'ordre 1 pour $f(x_i)$

$$\frac{df(x_i)}{dx} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h}$$

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- l'équation différentielle devient

$$\frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} = \rho(x_i) = \rho_i$$

- on peut la résoudre en débutant à $i = 0$

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + h\rho_i$$

- ici, la solution est identique à celle obtenue en utilisant la méthode de Euler avec un intervalle h ;
- cette méthode fonctionne aussi lorsque l'on est en présence de dérivées totales et partielles d'ordre supérieur.

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Méthode des volumes finis.

- Dans ce cas, on divise le domaine en sous-éléments de volume finis, et on intègre les équations différentielles (Navier-Stokes par exemple) sur chaque élément.
- L'intégrale de termes qui contiennent des dérivées premières en 1-D est exacte et est reliée à la solution aux frontières de l'intervalle.
- En 3-D on peut utiliser le théorème de la divergence pour remplacer les intégrales sur le volume de la divergence d'une fonction par l'intégrale de la fonction sur les surfaces des volumes finis.

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Exemple :

- considérons encore l'équation

$$\frac{df(x)}{dx} = \rho(x)$$

avec $f(x_0)$ et $\rho(x)$ connues ;

- on divise la région en N volumes finis (en 1D ces volumes correspondent à des cellules de largeur h dont le centre est noté \bar{x}_i et les extrémités sont à x_{i-1} et x_i pour $i = 1, N$)

$$\bar{x}_i = (x_i + x_{i-1})/2$$

$$h = (x_i - x_{i-1})$$

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- on définit ensuite la moyenne de ρ ($\bar{\rho}_i$) sur le volume en utilisant

$$\bar{\rho}_i = \frac{1}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \rho(x) dx = \frac{1}{h} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \rho(x) dx$$

- en intégrant l'équation différentielle sur chaque volume fini on obtient

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{df(x)}{dx} dx = f(x_i) - f(x_{i-1})$$

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} \rho(x) dx = h\bar{\rho}_i$$

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- on obtient finalement

$$f_i = f_{i-1} + h\bar{\rho}_i$$

- on résout ensuite étape par étape pour chaque volume en commençant avec $i = 1$ (x_0 est connu) ;
- dans ce cas la solution est semblable à celle obtenue par la méthode des différences finies avant si on remplace la valeur de ρ au point initial (x_{i-1}) par la moyenne de ρ sur l'intervalle $[x_{i-1}, x_i]$.

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

L'avantage de la méthode des volumes finis :

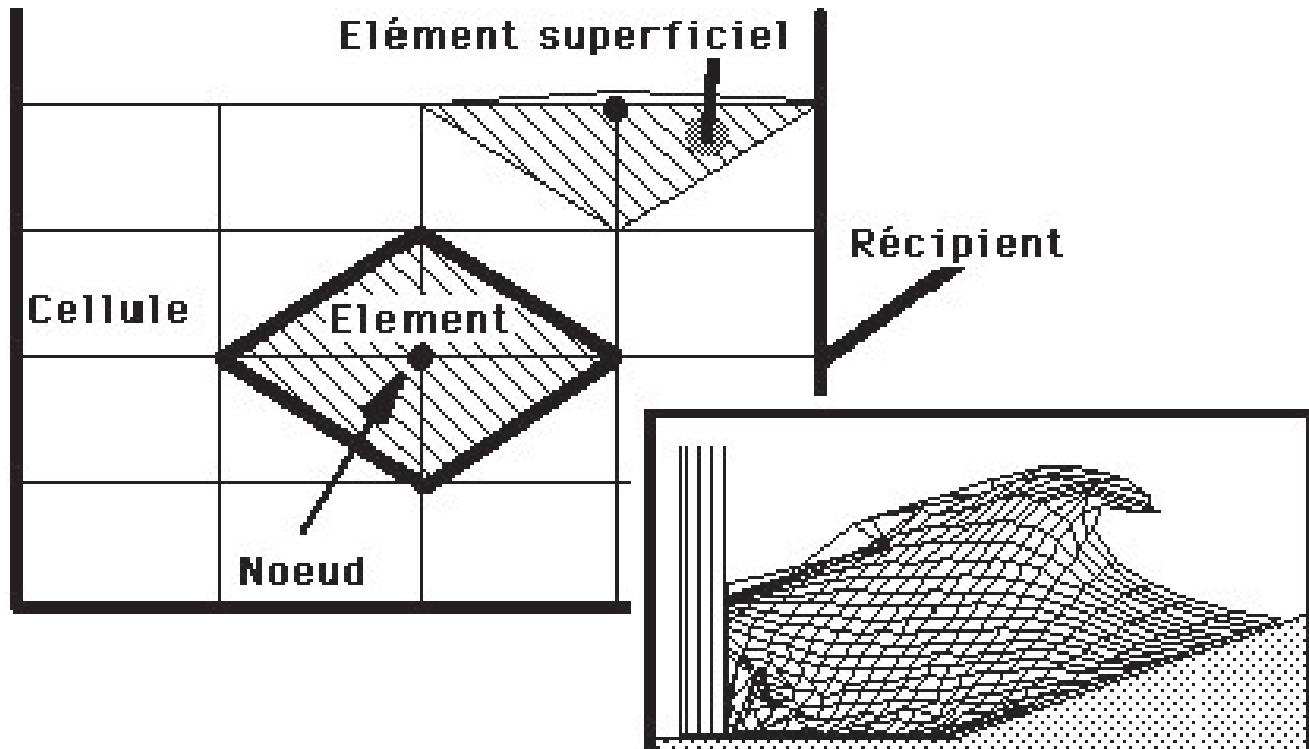
- pour les problèmes en 3-D impliquant des divergences, l'intégrale de volume peut être remplacée par une intégrale de surface ;
- la méthode des volumes finis implique seulement les termes de circulation $f(x)$ aux interfaces (qui doivent être continus d'un volume à l'autre), alors que l'on utilise la moyenne de la variable d'état ρ sur le volume ;
- dans les cas où ρ a une dépendance importante sur x dans la région elle est préférable à la méthode des différences finies.

Simulations numériques

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Simulation numérique décrivant le comportement d'une onde déferlante.



Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Les ondes de pression.

- Ici, nous étudierons les ondes de pression dans un fluide compressible (un gaz) à partir des équations de Navier-Stokes.
- Ces ondes de pression dans l'air donnent naissance à ce que notre appareil auditif détecte comme des sons (ondes sonores).

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Équations de la dynamique des fluides

- Équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\tau} \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{q} + \vec{r})$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \boldsymbol{\tau} + \rho \vec{f}$$

- Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques

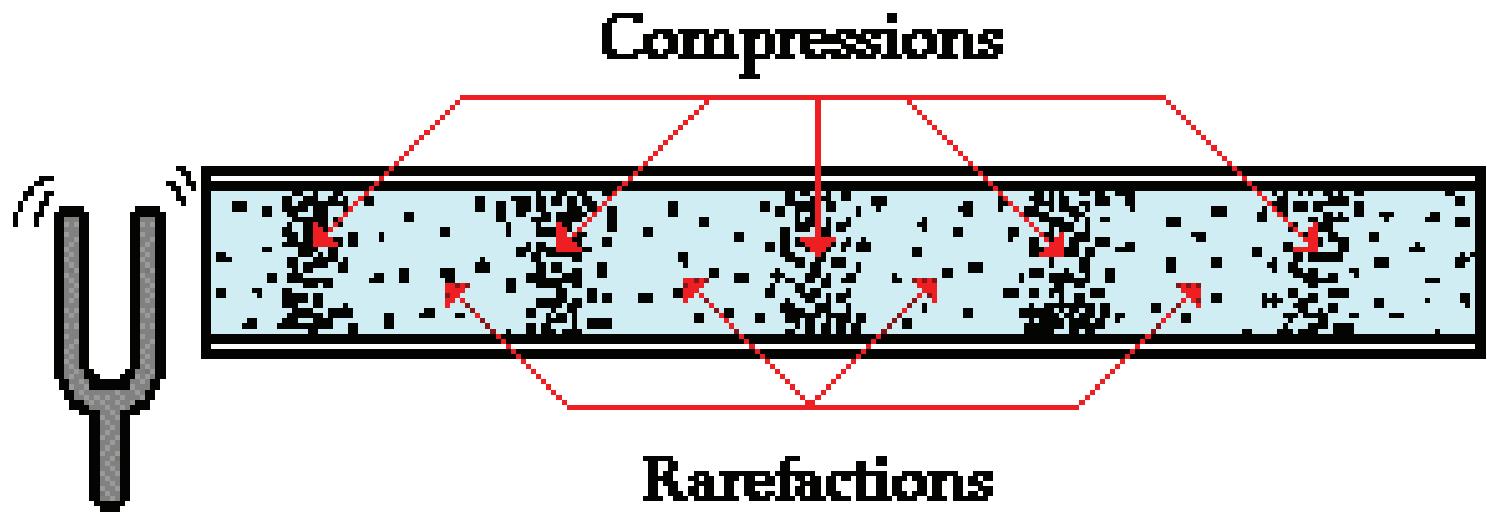
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Ondes de pression.



Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Dérivation.

- Pour un gaz parfait, l'équation d'état est

$$p = \frac{\rho RT}{M} = \gamma \rho$$

où γ est fonction de la température.

- Pour un processus adiabatique (sans échange de chaleur) on supposera que γ est constant et on peut écrire

$$\gamma = \frac{\partial p}{\partial \rho}$$

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

On supposera que la pression p et la densité ρ du gaz varieront autour de valeurs d'équilibre p_0 et ρ_0 lors du passage de l'onde.

- On définit s la variation relative de la masse volumique par rapport à ρ_0

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$$

et donc $\rho = \rho_0(1 + s)$.

- Une expansion de p au premier ordre en ρ donne alors

$$p = p_0 + \frac{\partial p}{\partial \rho}(\rho - \rho_0) = p_0 + \gamma \rho_0 s = p_0 + \tilde{p}$$

avec $\tilde{p} = \gamma \rho_0 s$ la pression exercée par l'onde.

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- L'équation de conservation de masse en 1-D donne

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \frac{\partial(1+s)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial((1+s)v)}{\partial x}$$

- Si on admet que le terme s était négligeable par rapport à 1 on obtient alors

$$\frac{1}{\gamma \rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = - \frac{\partial v}{\partial x}$$

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- L'équation de conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire (en utilisant $p = p_0 + \tilde{p}$ et $\rho = \rho_0(1 + s)$ et en ne conservant que les termes dominants on obtient)

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x}$$

(Pas de forces externes, ni de frottement visqueux).

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

On peut ensuite combiner l'équation de conservation de masse et de quantité de mouvement en prenant la dérivée de la première par rapport à t et de la seconde par rapport à x et en éliminant le terme vitesse v

$$\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t^2} = \gamma \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial x^2}$$

qui est l'équation pour une onde dont la vitesse c est donnée par

$$c = \sqrt{\gamma}$$

en se rappelant que \tilde{p} est la différence de pression entre l'onde (p) et le milieu (p_0).

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Si on élimine \tilde{p} au lieu de ν des équations de conservation on obtient plutôt

$$\frac{\partial^2 \nu}{\partial t^2} = \gamma \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2}$$

qui est aussi une équation d'onde de vitesse c donnée par

$$c = \sqrt{\gamma}$$

les vitesses des molécules ont donc aussi un comportement ondulatoire.

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- On utilise généralement

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\frac{c_p \cdot p}{c_v \rho}} = \sqrt{\frac{\beta \cdot p}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{\beta \cdot p_0}{\rho_0}}$$

où c_p et c_v sont les capacités thermiques massiques à pression et volume constants. Pour l'air $\beta = c_p / c_v = 1.4$ et on a supposé que $\tilde{p} \ll p_0$ et $s \ll 1$.

- On peut aussi écrire la dépendance en température comme suit :

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\beta R_s T}$$

avec $R_s = 287 \text{ J/kg/K}$ et T la température en K.

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Pour l'air, on utilisera une approximation pour $c(T) = c(\Theta)$ de la forme

$$c_{\text{air}}(T) = c_{\text{air}}(\Theta) = (331.3 + 0.606\Theta) \text{ m/s}$$

avec $\Theta = T - 273.16$ la température en C.

- Cette relation est valide pour des températures variant de -20 C à 40 C avec une erreur inférieure à 0.2%.
- À 20 C on obtient $c_{\text{air}} = 343.3$ m/s.
- Pour l'hélium à 0 C $c_{\text{hélium}} = 972$ m/s.

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Solution générale en 1 D.

$$\tilde{p}(x, t) = f\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi\nu t\right) + g\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + 2\pi\nu t\right)$$

avec ν la fréquence et $\lambda = c/\nu$ la longueur d'onde de l'onde.

■ Onde plane en 1-D

$$\tilde{p}(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} \pm 2\pi\nu t\right)$$

■ Onde sphérique en 3-D

$$\tilde{p}(r, t) = \frac{A}{r} \sin\left(\frac{2\pi r}{\lambda} \pm 2\pi\nu t\right)$$

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Énergie d'une onde sonore.

- L'intensité I d'une onde sonore est donnée par la relation $I = \nu \tilde{p}$ où ν est la vitesse des particules qui se déplacent dans l'onde (pas la vitesse de l'onde qui est notée c).
- Pour une source d'intensité I (W/m^2), la puissance P véhiculée par l'onde sonore est donnée par

$$P = \int I dS$$

- Une source de puissance P émettant uniformément dans toutes les directions aura une intensité

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Comme ces particules se déplacent sous l'action de la pression, la force exercée sur les particules est proportionnelle à l'accélération de celles-ci et donc (en 3-D)

$$\rho v = - \int (\vec{\nabla} \cdot \vec{p}) dt \approx \frac{p}{c}$$

pour une onde sinusoïdale en 3-D. Donc

$$I \approx \frac{p^2}{\rho c}$$

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Niveau de puissance sonore

- L'ouïe humaine peut détecter des différences de pression dans l'air variant de $20 \mu\text{Pa}$ à environ 100 Pa (seuil de la douleur).
- Ceci donne des valeurs de la puissance sonore P variant de plus de 14 ordres de grandeur.
- On utilise en général une échelle logarithmique pour qualifier le niveau de puissance sonore L_P :

$$L_P = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ dB}$$

avec $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Le niveau d'intensité L_I sonore est relié au niveau de puissance sonore par :

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$
$$= L_P - 10 \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \text{ dB}$$

avec $S_0 = 1 \text{ m}^2$ et S la surface sur laquelle est distribuée la puissance P .

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Exemples de niveaux de puissance sonore.

Émetteur	P (W)	L_P (dB)
Fusée	1,000,000	180
Avion à réaction	10,000	160
Sirène	1,000	150
Concert rock	100	140
Hélicoptère	0.01	100
Cris	0.001	90
Frigo	10^{-7}	50
Seuil d'audition (à 28 cm)	10^{-12}	0

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Atténuation des ondes sonores

- La principale raison de l'atténuation du son est sa dispersion. Comme nous l'avons déjà vu, la pression d'une onde sonore sphérique diminue en $1/r$, son intensité variant comme $1/S$.
- Si on connaît l'intensité d'une onde sonore à une distance r_0 de la source, son intensité à une distance r sera alors donnée par

$$L_I(r) = L_I(r_0) - 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \text{ dB}$$

- L'intensité du son diminue d'environ 6 dB chaque fois que l'on double la distance.

Ondes sonores

Les fluides
Simulations
numériques

Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- L'atténuation des ondes sonores peut aussi être due à leur perte d'énergie à mesure qu'elles se déplacent dans le milieu.
- Cette perte d'énergie est souvent faible puisqu'elle est reliée aux collisions entre les molécules du gaz dans le milieu.
- Elle dépend fortement de la fréquence de l'onde sonore.

Atténuation des ondes sonores dans l'air à 20 °C et 70 %
d'humidité relative.

Fréquence	Coefficient d'atténuation
125 Hz	0.3 dB/km
250 Hz	1.1 dB/km
500 Hz	2.8 dB/km
1000 Hz	5.0 dB/km
2000 Hz	9.0 dB/km
8000 Hz	76.6 dB/km

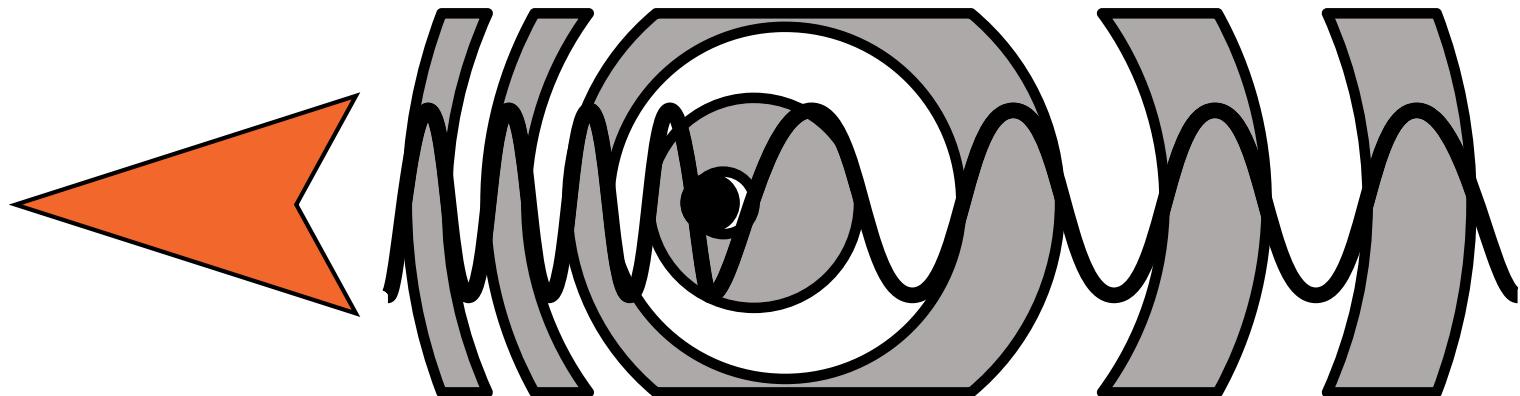
Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

L'effet Doppler c'est

- le décalage de fréquence d'une onde entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

Cet effet fut décrit la première fois par Christian Doppler en 1842 et confirmé sur les sons en utilisant des musiciens jouant une note calibrée sur un train de la ligne Utrecht-Amsterdam.



Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface
Conclusions

- L'effet Doppler se manifeste par exemple pour les ondes sonores dans la perception de la hauteur du son d'un moteur de voiture, ou de la sirène d'un véhicule d'urgence.
- Le son est différent selon que l'on est dans le véhicule (l'émetteur est immobile par rapport au récepteur), que le véhicule se rapproche du récepteur (le son devient plus aigu) ou qu'il s'éloigne (le son devient plus grave).
- Cet effet est utilisé pour mesurer une vitesse, par exemple celle d'une voiture, ou bien celle du sang lorsqu'on réalise des examens médicaux (notamment les échographies en obstétrique ou en cardiologie).

Effet Doppler

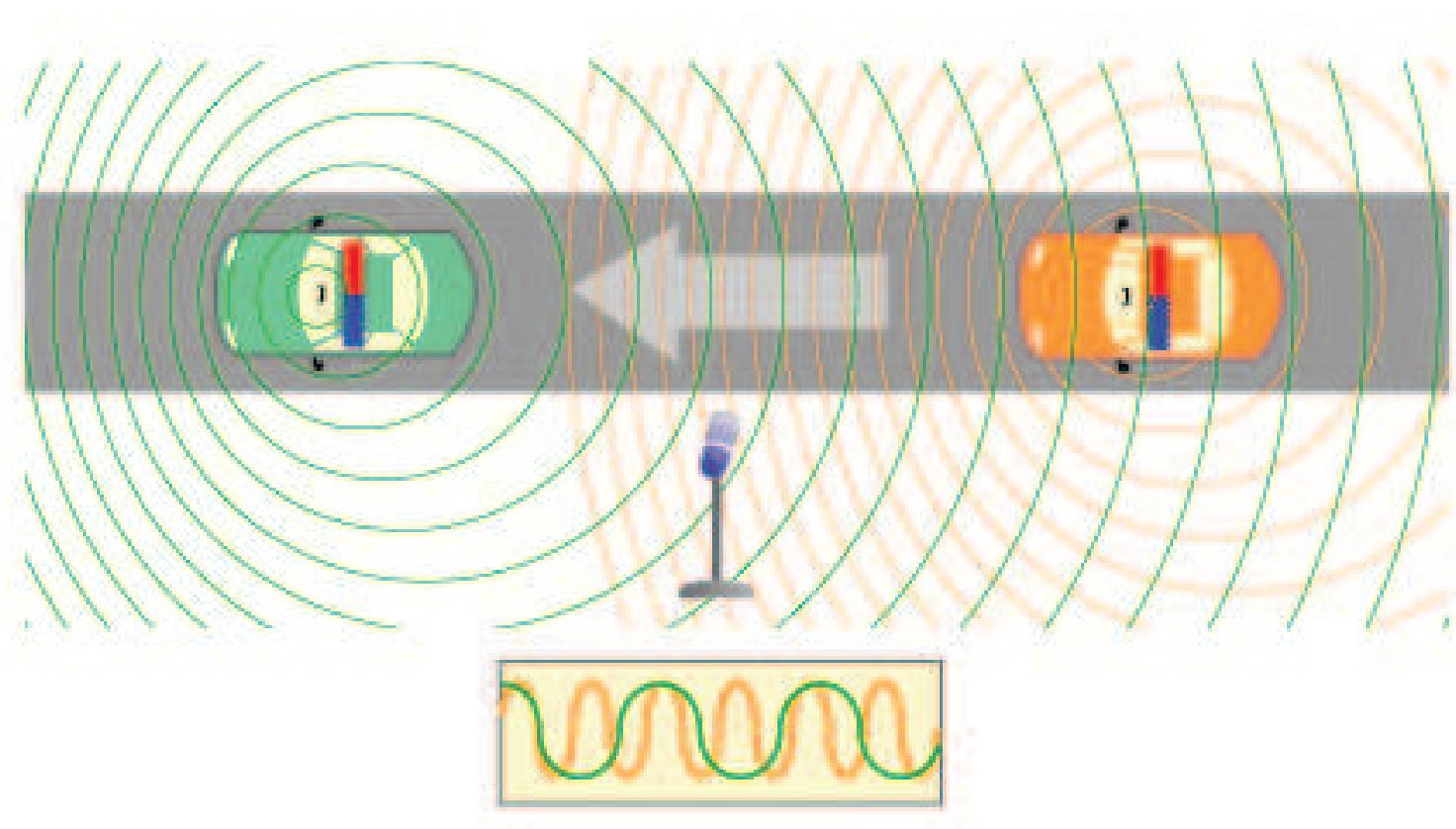
Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

Son perçu par une automobiliste en mouvement par rapport à une source fixe.



Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface
Conclusions

- Il s'applique aussi à la lumière et est donc d'une grande importance en astronomie, car il permet de déterminer directement la vitesse d'approche ou d'éloignement des objets célestes (étoiles, galaxies, nuages de gaz, etc.).
- Il s'applique aussi aux ondes de surface (vagues) même si on en tient peu compte, les vitesses mises en jeu étant trop faibles.

Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Description de l'effet Doppler :

- une personne est debout dans l'eau, au bord du rivage ;
- des vagues lui arrivent sur les pieds toutes les dix secondes ;
- la personne commence à marcher et va à la rencontre des vagues ;
- les vagues l'atteignent avec une fréquence plus élevée (par exemple toutes les huit secondes) ;
- la personne fait alors demi-tour et marche en direction de la plage ;
- les vagues l'atteignent avec une fréquence moins élevée (par exemple toutes les douze secondes) ;
- la fréquence des vagues ne dépend pas du mouvement de la personne par rapport à l'eau, mais elle dépend du mouvement de la personne par rapport à la source (émetteur de vagues) ;

Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- on peut aussi considérer une source mobile de vagues et un observateur au repos ;
- si la source se déplace dans la direction de l'observateur alors il observera des vagues plus resserrées ;
- si la source se déplace dans la direction opposée à l'observateur alors il observera des vagues plus espacées.

Pour dériver l'effet Doppler il faut donc considérer trois référentiels :

1. le référentiel du milieu dans lequel se propage l'onde de vitesse c (par exemple l'air pour une onde sonore) ;
2. le référentiel de vitesse \vec{v}_s lié à l'émetteur (source) et situé à $\vec{r}_s(t)$;
3. le référentiel de vitesse \vec{v}_r lié au récepteur et situé à $\vec{r}_r(t)$.

Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- on supposera aussi que l'onde se déplace en ligne droite de la source au récepteur dans la direction

$$\vec{u}_{s,r} = \frac{\vec{r}_r(t) - \vec{r}_s(t)}{|\vec{r}_r(t) - \vec{r}_s(t)|}$$

- ainsi, les vitesses du récepteur et de la source sont positives si dans la direction de propagation du signal ($\vec{u}_{s,r}$) et négatives dans une direction opposée.

Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- si ν_s est la fréquence de l'onde dans le référentiel de la source, alors le récepteur va recevoir une onde de fréquence ν_r donnée par

$$\nu_r = \frac{c - (\vec{\nu}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c - (\vec{\nu}_s \cdot \vec{u}_{s,r})} \nu_s = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} \nu_s$$

avec

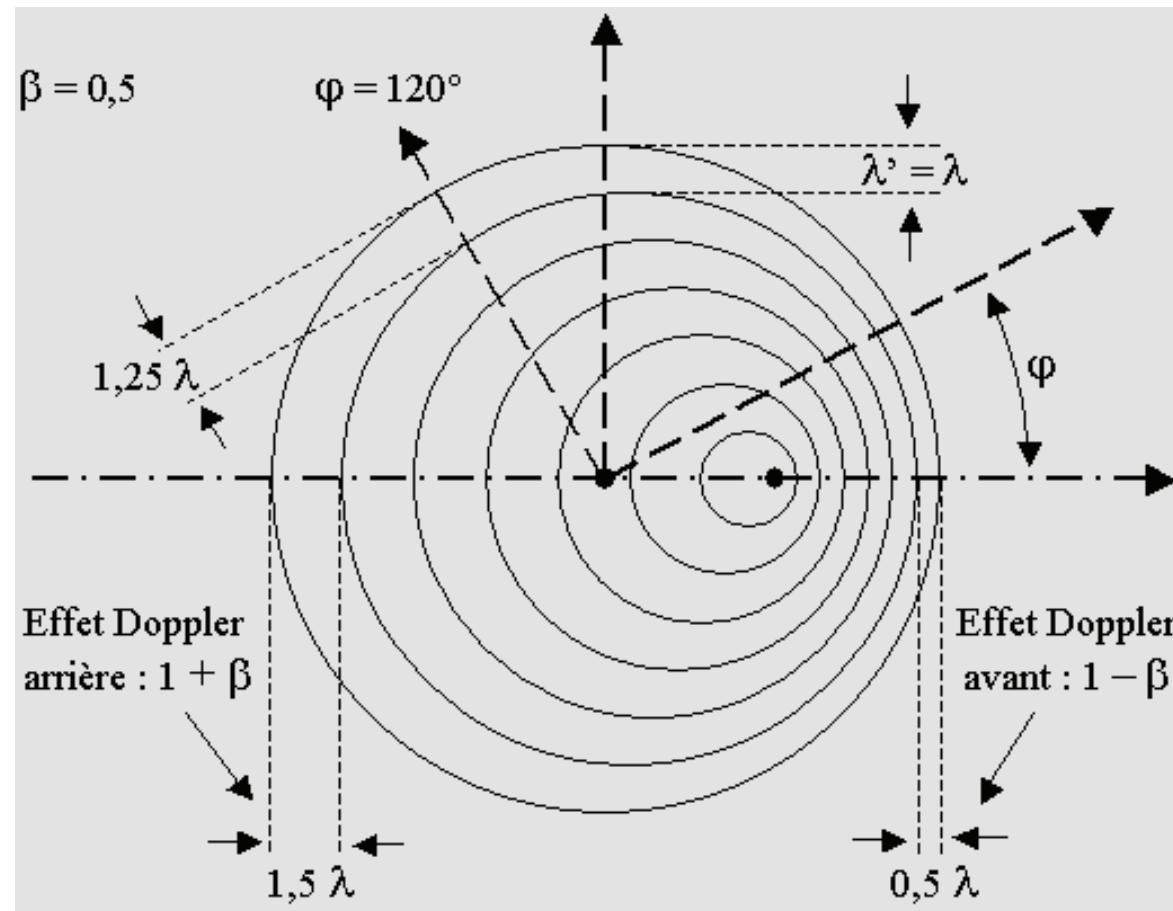
$$\beta_r = \frac{(\vec{\nu}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c} = \frac{|\vec{\nu}_r| \cos(\theta)}{c}$$

$$\beta_s = \frac{(\vec{\nu}_s \cdot \vec{u}_{s,r})}{c} = \frac{|\vec{\nu}_s| \cos(\theta')}{c}$$

Effet Doppler

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
Effet Doppler
 Ondes de surface
 Conclusions

Effet Doppler dû au mouvement de la source.



Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Preuve :

- supposons que l'émetteur produise des bips à une fréquence ν_s ;
- lorsque le deuxième bip est produit, le premier bip a parcouru une distance

$$d_{e,0} = \frac{c}{\nu_s}$$

- la source s'étant déplacée de $c\beta_s/\nu_s$, la distance séparant deux bips est

$$d_{e,1} = \frac{c(1 - \beta_s)}{\nu_s}$$

Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- si récepteur reçoit le premier bip après un temps t_1 et le deuxième bip après un temps t_2 , il aura lui-même parcouru la distance

$$d_{r,1} = c\beta_r(t_2 - t_1) = \frac{c\beta_r}{\nu_r}$$

où $\nu_r = 1/((t_2 - t_1))$ est la fréquence perçue par le récepteur.

- le déplacement total du second bip par rapport au premier pour le récepteur étant

$$d_{r,2} = d_{e,1} + d_{r,1} = \frac{c}{\nu_r}$$

Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

■ on écrira alors

$$\frac{c(1 - \beta_s)}{v_s} + \frac{c\beta_r}{v_r} = \frac{c}{v_r}$$

d'où

$$v_r = \frac{c - (\vec{v}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c - (\vec{v}_s \cdot \vec{u}_{s,r})} v_s = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} v_s$$

Effet Doppler

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores

Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- si l'émetteur est immobile et le récepteur en mouvement on obtient

$$\nu_r = (1 - \beta_r) \nu_s$$

- si l'émetteur est en mouvement et le récepteur immobile on obtient

$$\nu_r = \frac{1}{1 - \beta_s} \nu_s \approx (1 + \beta_s) \nu_s$$

la dernière approximation étant valide seulement lorsque $\beta_s \ll 1$.

Notez que lorsque l'émetteur se rapproche de la source $\beta_s > 0$ alors que si c'est le récepteur se rapproche de la source $\beta_r < 0$.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Comportement des ondes de surface sur l'eau.

- Pour dériver les équations correspondantes, on doit éliminer la coordonnée verticale (z) des équations de Navier-Stokes tout en préservant les influences de la structure verticale résultant de la circulation du fluide sous l'onde.
- Ce deuxième effet est important, car l'onde se déplace dans le plan horizontal alors que son comportement dans la direction verticale n'est pas ondulatoire.

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
 Effet Doppler
Ondes de surface
 Conclusions

Équations de la dynamique des fluides

- Équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\tau} \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{q} + \vec{r})$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \boldsymbol{\tau} + \rho \vec{f}$$

- Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

Ondes de surface

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
 Effet Doppler
Ondes de surface
 Conclusions

- Ici, ce qui nous intéresse principalement c'est la propagation de l'onde à la surface de l'eau.
- Les équations qui décrivent les ondes de surface sont les équations de Boussinesq et résultent des équations pour les fluides incompressibles.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}$$

avec $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique du fluide. La première est l'équation de conservation de la masse et la seconde celle de la conservation de la quantité de mouvement (en supposant que ρ une constante).

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Dérivation des équations de Boussinesq.

- On suppose que la vitesse \vec{v} des molécules composant l'onde dérive d'un potentiel φ

$$\vec{v} = \vec{\nabla} \varphi$$

- Le potentiel satisfait l'équation de Laplace (le rotationnel de \vec{v} est nul)

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- On utilise une expansion en série de Taylor du potentiel de vitesse du fluide (séparation des composantes horizontales et verticales) autour d'une élévation h

$$\varphi = \varphi_b + \frac{1}{2} z^2 \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right]_{z=-h} + \dots$$

- On limite cette expansion à un nombre fini de termes.
- On utilise les équations de conservation de la masse pour remplacer les dérivées partielles en z (verticales) des vitesses par des dérivées partielles en x et y (horizontales).

Ondes de surface

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
 Effet Doppler
Ondes de surface
 Conclusions

Ondes se propageant selon la direction horizontale x .

- On suppose que ρ est constant, car le liquide est incompressible.
- L'équation de conservation de la masse donne

$$\frac{\partial z(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + z(x, t)) v_x] = \frac{1}{6} h^3 \frac{\partial^3 v_x}{\partial x^3}$$

- L'équation de conservation de la quantité de mouvement devient

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + g \frac{\partial z(x, t)}{\partial x} = \frac{1}{2} h^2 \frac{\partial^3 v_x}{\partial t \partial^2 x}$$

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler

Ondes de surface

Conclusions

- v_x est la vitesse de l'onde selon l'axe x ;
- $z(x, t)$ est l'élévation de la surface de l'onde par rapport à la surface plane de l'eau ;
- h est la profondeur d'eau (ici nous avons supposé que cette profondeur était une constante) ;
- lorsque les termes de droite sont négligés, on obtient l'approximation des ondes dans des eaux peu profondes.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- En combinant ces deux équations (et quelques approximations supplémentaires) on obtient une équation d'onde

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - gh \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - gh \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{3}{2} \frac{z^2}{h} + \frac{1}{3} h^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) = 0$$

Ondes de surface

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
 Effet Doppler
Ondes de surface
 Conclusions

- Cette équation d'ondes peut se réécrire sous la forme

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \left(\frac{1}{2} \psi^2 + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \right) = 0,$$

avec

$$\psi = 3 \frac{z}{h}$$

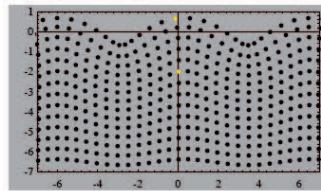
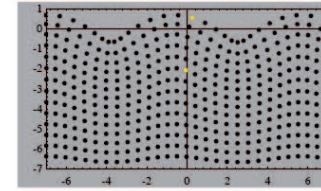
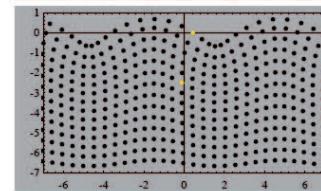
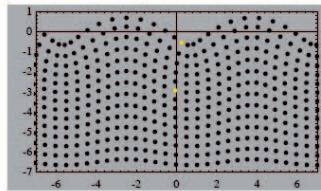
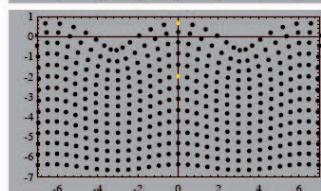
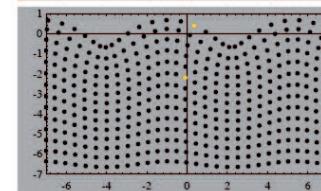
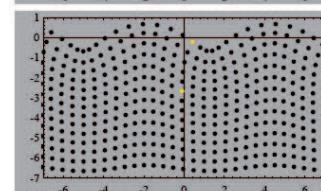
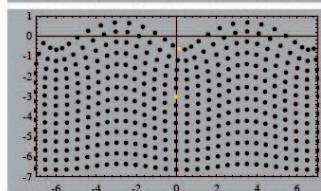
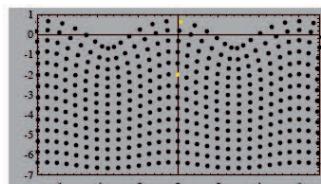
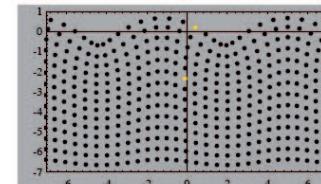
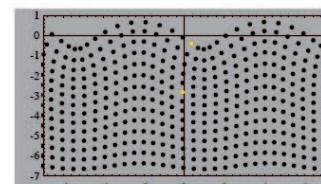
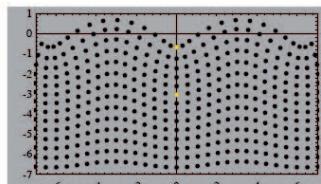
$$\tau = \sqrt{3} t \sqrt{\frac{g}{h}}$$

$$\xi = \sqrt{3} \frac{x}{h}$$

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Mouvement des molécules de l'onde.

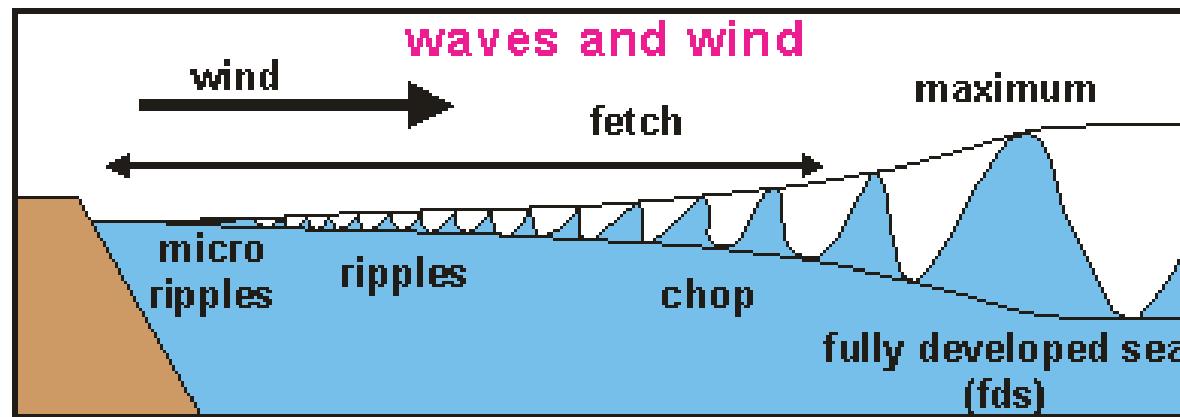


Voir aussi [Wave Motion](#).

Ondes de surface

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
 Effet Doppler
Ondes de surface
 Conclusions

Génération des vagues.



As waves develop, they offer more surface area for the wind to press against (wind stress). Depending on both fetch and time, the size of the waves increases quadratically to a maximum. The energy imparted to the sea increases with the fourth power of the wind speed! As waves develop, they become more rounded and longer and they travel faster. Their maximum size is reached when they travel almost as fast as the wind. A 60 knot storm lasting for 10 hours makes 15m high waves in open water.

Relation de dispersion.

- Les ondes de différentes longueurs d'onde se déplacent à différentes vitesses de phase.
- Cette relation entre la vitesse et la longueur d'onde est reliée à la relation de dispersion.
- Pour l'équation d'onde que nous avons dérivée la relation de dispersion est donnée par

$$\nu = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}$$

avec ν la fréquence de l'onde.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- La vitesse de phase de l'onde c_ϕ (vitesse des crêtes) est donnée par

$$c_\phi = \lambda\nu = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}$$

pour une longueur d'onde λ .

- La vitesse de groupe de l'onde (enveloppe de l'onde) est donnée par

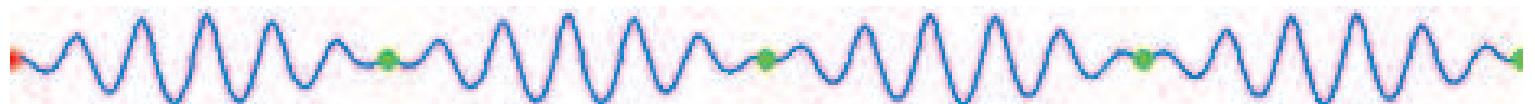
$$c_g = \frac{\partial\nu}{\partial k}$$

avec $k = 1/\lambda$.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Vitesse de l'onde.



Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- En eaux très profondes, la vitesse de phase de l'onde sera donnée par

$$c_\phi = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

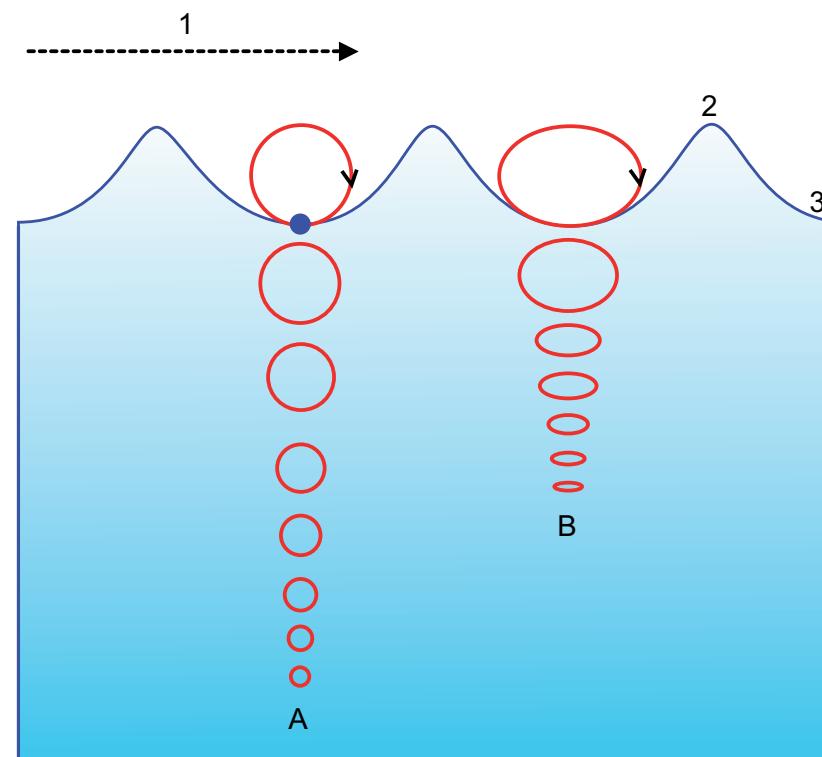
- En eaux peu profondes, la vitesse de phase de l'onde sera donnée par

$$c_\phi = \sqrt{gh}$$

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Vitesse de l'onde en fonction de la profondeur.



Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Énergie de l'onde et amplitude.

- La densité d'énergie (énergie par unité de surface) d'une onde est donnée par

$$E = \frac{1}{8} \rho g z^2$$

- La vitesse de propagation de cette énergie est donnée par la vitesse de groupe.

Ondes de surface

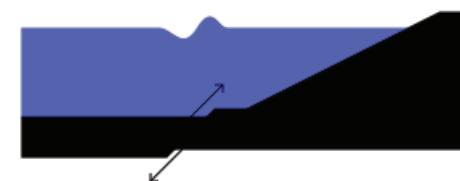
Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Hauteur de l'onde en fonction de sa vitesse.

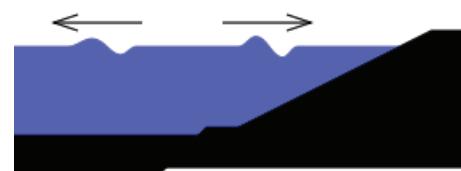
1. Côte à l'état normal



2. Séisme



3. Propagation du tsunami



4. Retrait de la mer



5. Déferlement



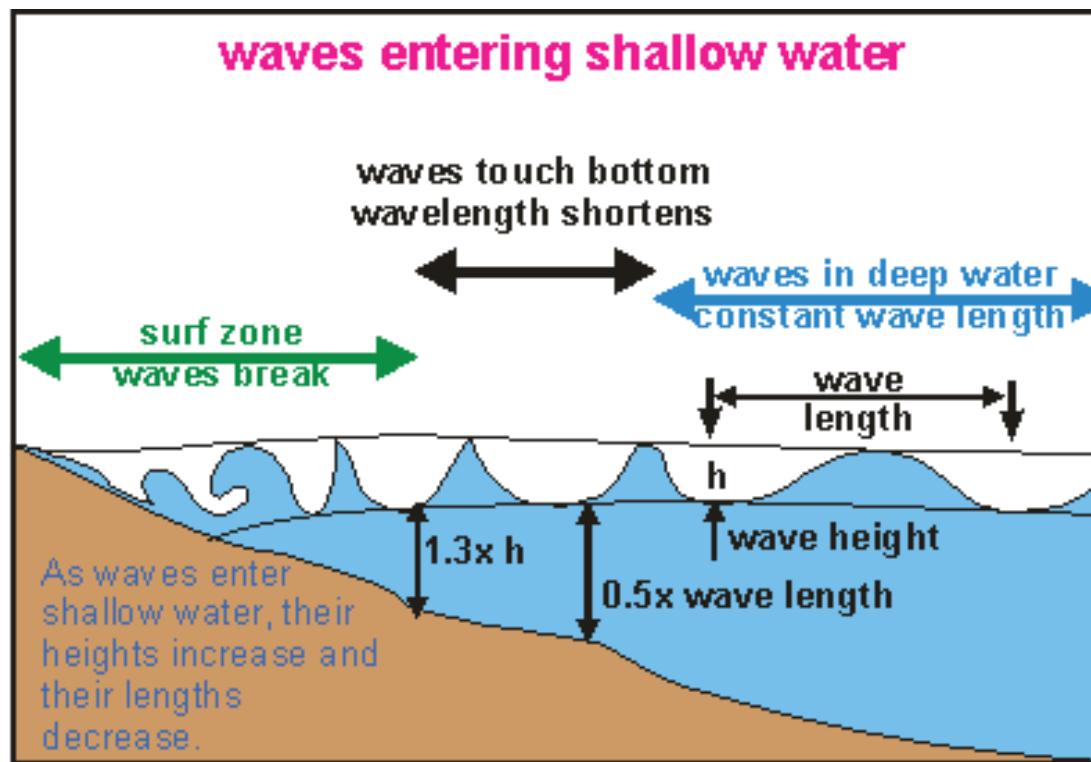
Déferlante.

- La vitesse de la vague diminue lorsqu'elle atteint la plage (h diminue) et sa hauteur augmente.
- Cependant, ce ralentissement n'atteint pas toutes les molécules de la vague en même temps et on se retrouve alors dans la situation où les molécules au haut de la vague se déplacent plus rapidement que les molécules près de la surface.
- La vague se brise alors et on est en présence d'une vague déferlante. Ce phénomène se produit lorsque la profondeur h devient inférieure à une valeur de $1.3A$ avec A l'amplitude de la vague.

Ondes de surface

Les fluides
 Simulations
 numériques
 Ondes sonores
 Effet Doppler
Ondes de surface
 Conclusions

Déferlante.



Les tsunamis

- Un tsunami est une onde provoquée par un mouvement rapide d'un grand volume d'eau (océan ou mer).
- Ce mouvement est en général dû à un séisme ou bien un glissement de terrain sous-marin de grande ampleur.
- Contrairement aux vagues, un tsunami n'est pas créé par le vent.

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Propagation des tsunamis.

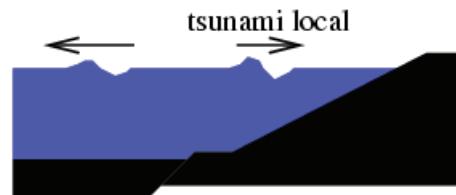
1. cote a l'etat normal



2. seisme



3. propagation du tsunami



4. retrait de la mer



5. deferlement



Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Les tsunamis peuvent atteindre une vitesse de 800 km/h quand le fond de l'océan est profond.
- Ils sont imperceptibles au large, car leur amplitude y dépasse rarement le mètre pour une période (temps entre deux vagues successives) de plusieurs minutes à plusieurs heures.
- Ils peuvent provoquer d'énormes dégâts sur les côtes où ils se manifestent par une baisse du niveau de l'eau ou un raz-de-marée.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Dans certains cas assez rares, le tsunami peut prendre la forme d'une vague déferlante (un soliton).
- 75 % des tsunamis se produisent dans l'océan Pacifique, la plupart des autres dans l'océan Indien.
- Ils peuvent se propager sur des milliers voire une dizaine de milliers de kilomètres.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Le déplacement d'eau crée un mouvement de grande longueur d'onde (généralement quelques centaines de kilomètres) et de grande période (quelques dizaines de minutes).
- Ce n'est pas principalement la hauteur du tsunami qui est responsable de sa force destructrice, mais la durée de l'élévation du niveau de l'eau et la quantité d'eau déplacée à son passage.
- Si des vagues de plusieurs mètres de hauteur, voire d'une dizaine de mètres, font légions sur les côtes de l'océan Pacifique, elles ne transportent généralement pas assez d'eau pour pénétrer dans les terres.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Un tsunami d'une hauteur d'un ou deux mètres peut s'avérer ravageur, car la quantité d'eau qu'il transporte lui permet de déferler jusqu'à plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres si le relief est plat et sans obstacle naturel (arbres, par exemple).
- On peut voir le phénomène sous un autre angle : une vague classique, d'une période d'au plus une minute, n'élève pas le niveau de l'eau suffisamment longtemps pour qu'elle pénètre profondément, tandis que le niveau des eaux s'élève au-dessus de son niveau normal pendant 5 à 30 minutes lors du passage d'un tsunami.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- En pleine mer, le tsunami se comporte comme la vague, les particules d'eau sont alors animées d'un mouvement elliptique à son passage.
- Il n'y a (presque) pas de déplacement global de l'eau, une particule retrouve sa position initiale après le passage du tsunami.
- Contrairement à la vague, le tsunami provoque une oscillation de l'eau aussi bien en surface qu'en profondeur.
- La quantité d'eau mise en mouvement est donc très importante.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

- Vitesse du tsunami (approximation profondeur faible, car $\lambda \gg h$)

$$v = \sqrt{gh} \approx 360\sqrt{h} \text{ km/h}$$

avec h la profondeur de la mer en km.

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

■ Longueur d'onde du tsunami

$$\lambda = \left(\frac{T}{60} \right) \nu$$

avec $T = 1/\nu$ sa période en minutes et ν la vitesse en km/h.

- La majorité des tsunamis d'origine tectonique ont une longueur d'onde supérieure à la centaine de kilomètres et des périodes supérieures à 1 heure.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Énergie de l'onde et amplitude.

- L'amplitude A du tsunami est donnée par la relation :

$$A \sim E^{1/2} r^{-1/2} h^{-1/4}$$

avec h la profondeur et r la distance qu'il a parcourue depuis son point d'origine.

- L'amplitude augmente lorsque l'eau devient moins profonde, en particulier à l'approche des côtes et quand l'énergie est plus élevée.
- Elle diminue avec la distance, car l'énergie se répartit sur un front d'onde plus grand.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Tsunami du 26 décembre 2004.

- Déplacement des plaques tectoniques qui a causé le tsunami : de 4 à 5 m verticalement.
- L'énergie totale mise en jeu par le séisme : 5×10^{22} J.
- La partie de cette énergie dissipée sous forme d'ondes sismiques (tremblements de terre) 2×10^{18} J.
- La partie de cette énergie associée au tsunami 2×10^{15} J (30 bombes d'Hiroshima).
- La vague a atteint une hauteur de plus de 30 m près des côtes.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Tsunami près des côtes.

- Lorsque le tsunami s'approche des côtes sa période et sa vitesse diminue, son amplitude augmente.
- Si son amplitude devient comparable à la profondeur de l'eau, une partie de la vitesse d'oscillation de l'eau se transforme en un mouvement horizontal global, appelé courant de Stokes.
- C'est plus ce mouvement horizontal qui est la cause des dégâts que l'élévation du niveau de l'eau.

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Tsunami près des côtes.

- À l'approche des côtes, le courant de Stokes d'un tsunami a pour vitesse théorique

$$u \approx \frac{A^2}{2h^2} v,$$

Ondes de surface

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Atténuation des vagues.

- En général, les ondes de surface sont atténuées à mesure qu'elles se déplacent.
- Ceci est dû aux forces de frottement internes du fluide qui sont reliées à sa viscosité.
- Sur la mer, cette atténuation des vagues est compensée par un apport constant d'énergie dû au vent.
- On obtient alors un équilibre, fonction de la vitesse des vents, qui déterminera aussi bien l'amplitude de la vague que sa longueur d'onde.

Atténuation des tsunamis.

- La source des tsunamis n'étant pas le vent on s'attend à ce qu'ils soient beaucoup plus affectés par la force de frottement (aucune source additionnelle d'énergie) et donc plus atténués que les vagues à mesure qu'ils se déplacent à la surface de l'eau.
- Cependant, le facteur d'atténuation d'une onde est inversement proportionnel à sa longueur d'onde.
- Les tsunamis ayant de très grandes longueurs d'onde leur atténuation est donc relativement faible ce qui leur permet de se propager sur de très longues distances.

Conclusions

Les fluides
Simulations
numériques
Ondes sonores
Effet Doppler
Ondes de surface
Conclusions

Dans le prochain chapitre nous étudierons l'acoustique incluant

- L'acoustique physique
- Les sons
- L'audition
- La musique