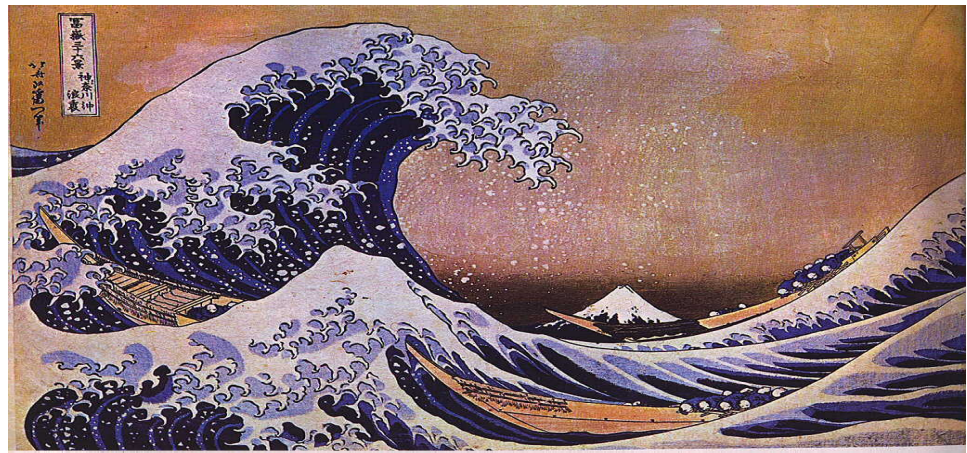
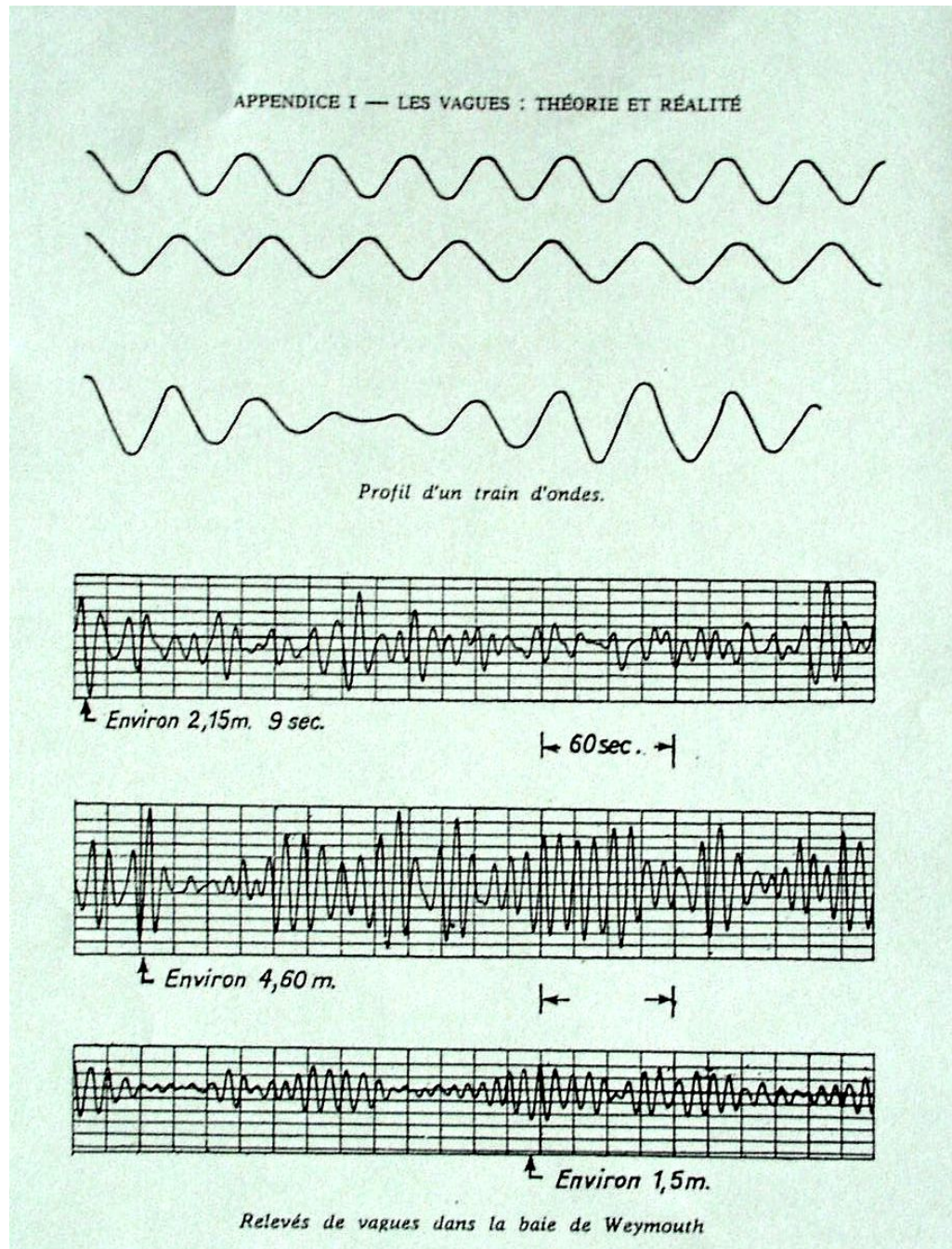


Chapitre 7 Ondes de surface

- Description
- Origine et disparition
- Propagation : mécanismes, vitesse...

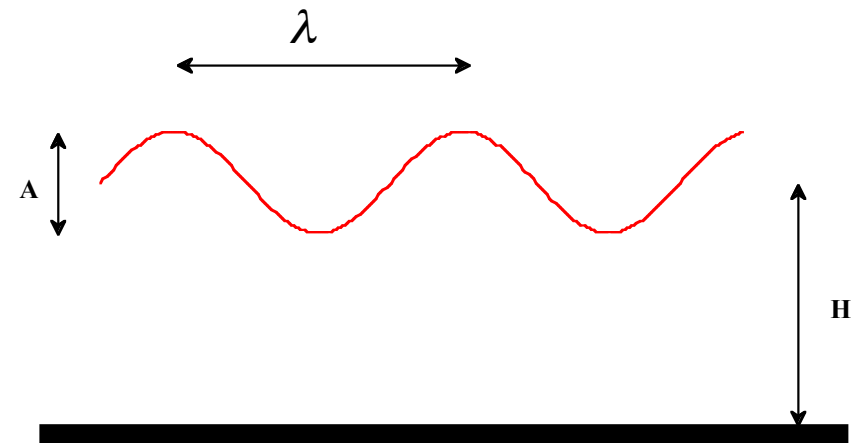


Description des vagues (régime linéaire)



- Transformée de Fourier

- Analyse modale



$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

λ longueur d'onde

k nombre d'onde

ω pulsation

f fréquence

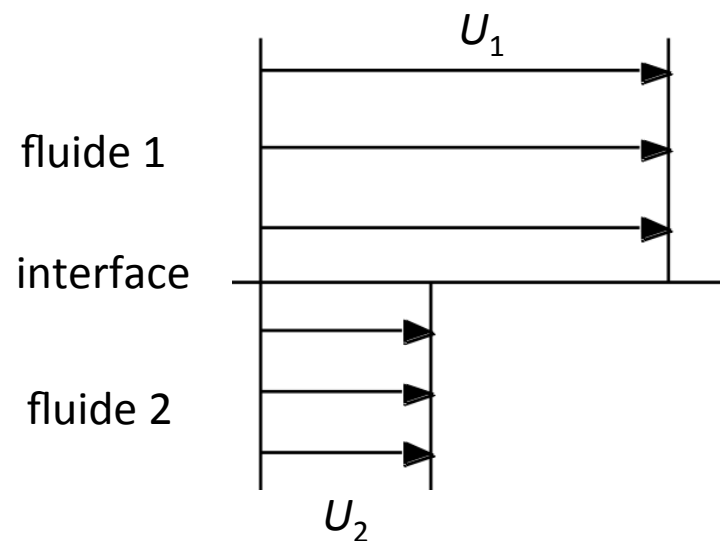
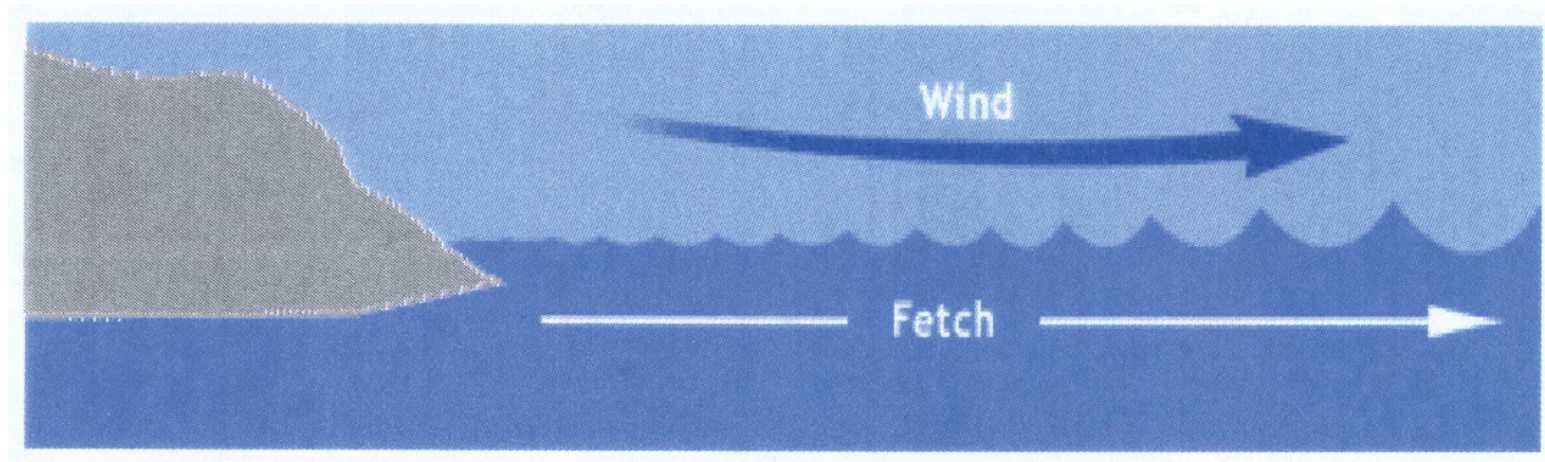
T période

c vitesse

Origine des vagues ?

Origines

- Action du vent : mécanisme inertiel de déstabilisation d'une interface plane entre deux couches de fluide de vitesse différentes (instabilité de Kelvin-Helmholtz, 1880)



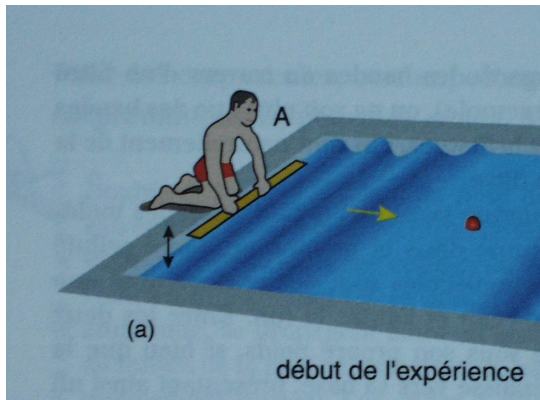
Les nuages montrent l'instabilité entre deux couches d'air

- Action mécanique:

batteur (canal à houle)

« splash » de surface (caillou jeté dans l'eau, effondrement de falaise...)

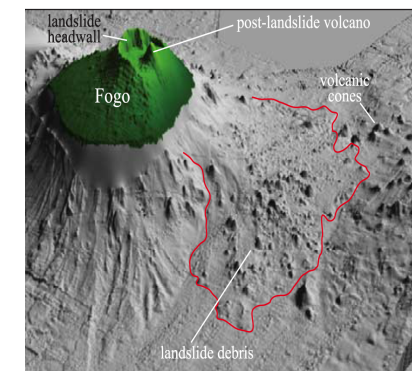
« splash » de fond (sismique)



canal à houle



Falaise (UK)



Ile volcanique (Cap-Vert)



Expériences de laboratoire (Labo FAST, Orsay)

Disparition des vagues ?

Disparition des vagues

- Dissipation au cours de la propagation

par frottement interne dus à la viscosité du liquide
important aux petites longueurs d'ondes (rides)
faible aux grandes longueurs d'ondes (houle)

et frottements aux parois dus à la viscosité du liquide
d'autant plus important que la paroi est proche

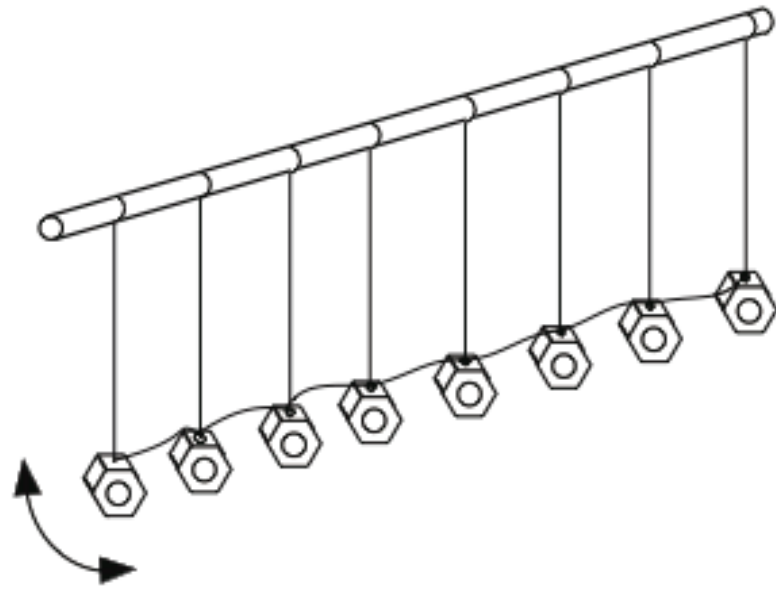
λ (m)	L (m)	τ
1 mm	12 mm	0,01 s
1 cm	30 cm	1 s
1 m	23 km	3,5 heures
10 m	7500 km	14 jours
100 m	60 fois le tour de la Terre !	4 ans !

- Dissipation lors du déferlement (en pleine mer ou sur la côte)

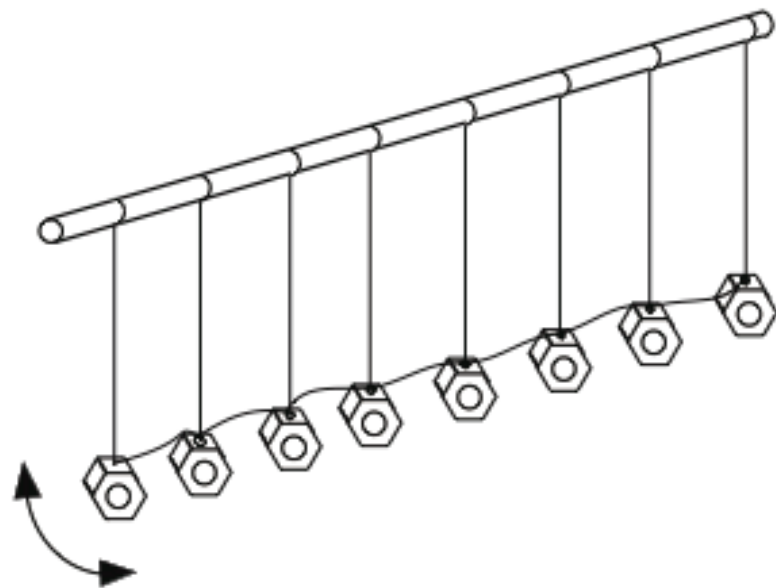


Mécanisme de propagation ?

Mécanisme de propagation ?

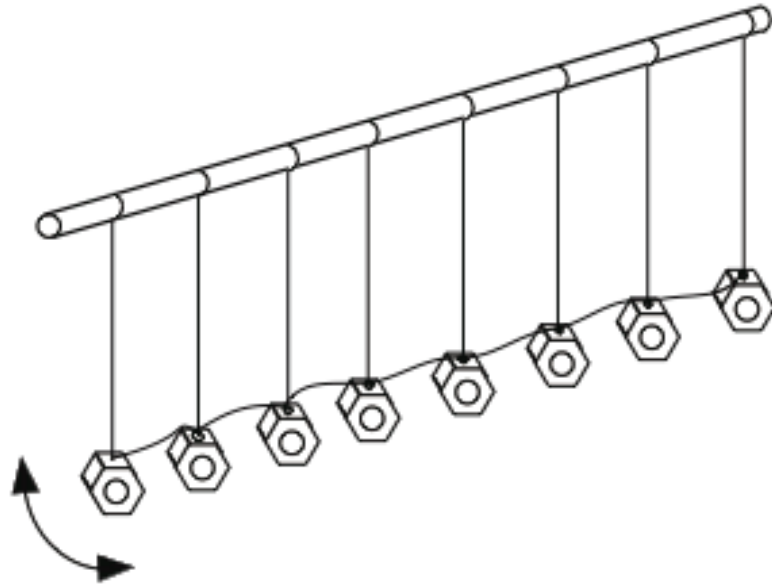


Mécanisme de propagation ?



- forces de rappel :
- gravité
 - tension de surface

Mécanisme de propagation



forces de rappel :
- gravité
- tension de surface

Caractéristiques de propagation ?

Ondes transverses ou longitudinales ? dispersives ou non dispersives ?

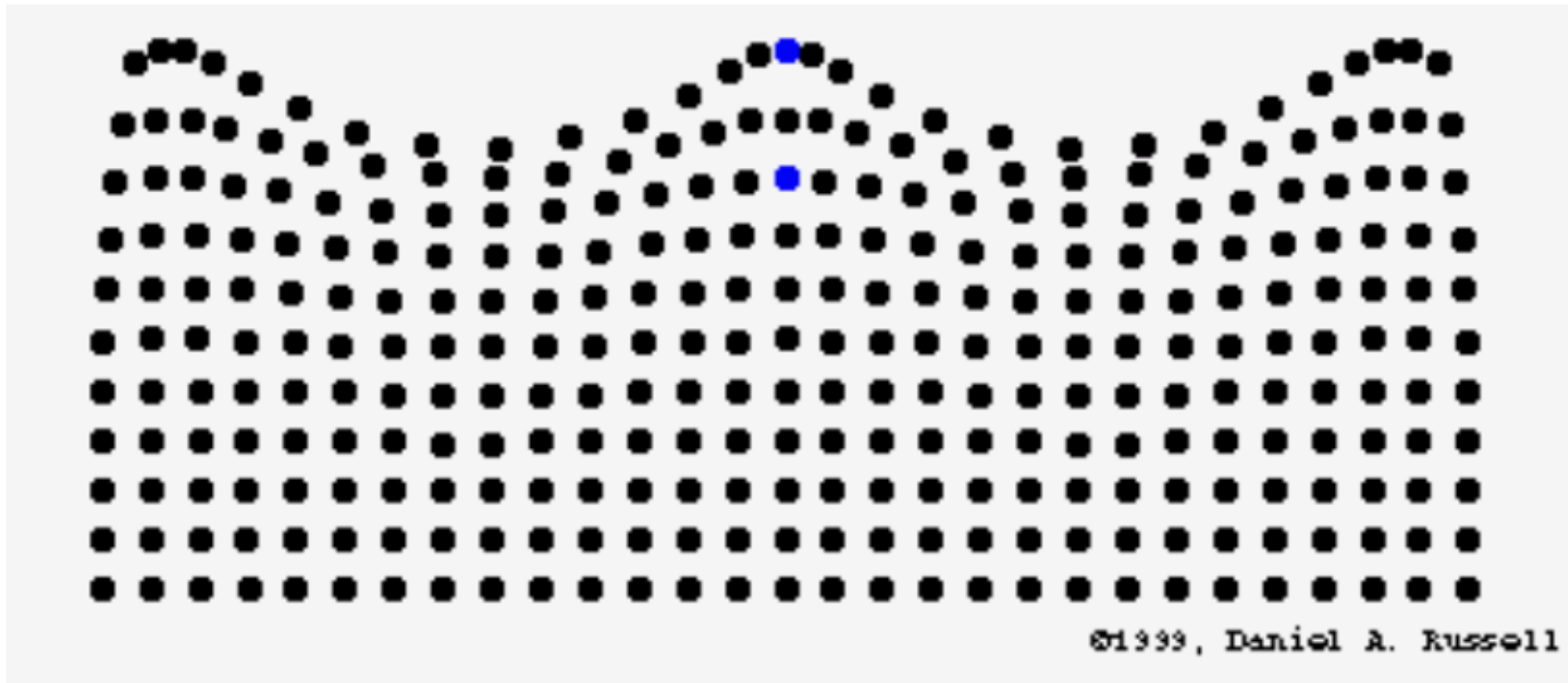
Ondes transverses : Ondes dont la direction de vibration est perpendiculaire à la direction de propagation

Ondes longitudinales : Ondes dont la direction de vibration est parallèle à la direction de propagation

Ondes dispersives : Ondes dont la vitesse de propagation dépend de la longueur d'onde

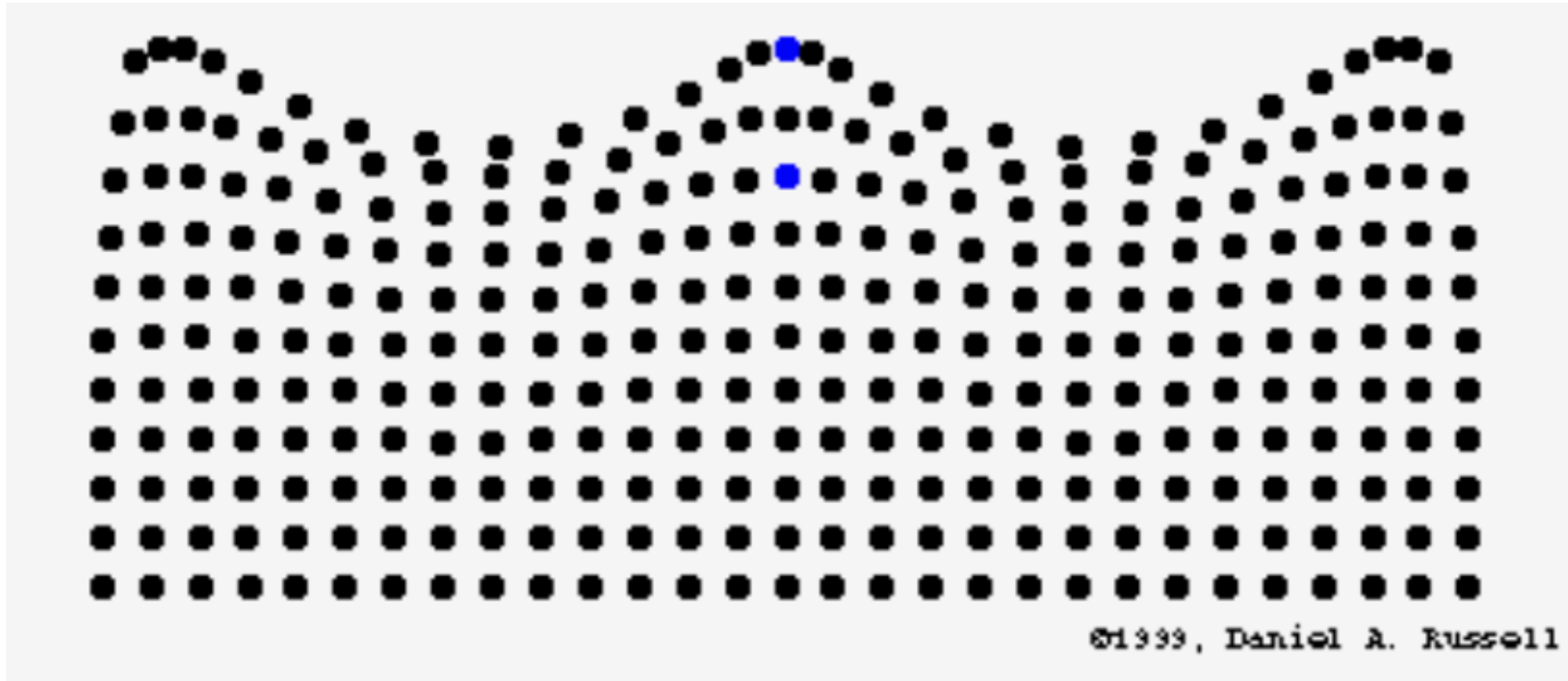
Mouvement de l'eau lors de la propagation d'onde de surface ?

Mouvement de l'eau lors de la propagation d'onde de surface ?



<https://www.youtube.com/watch?v=7yPTa8qi5X8>

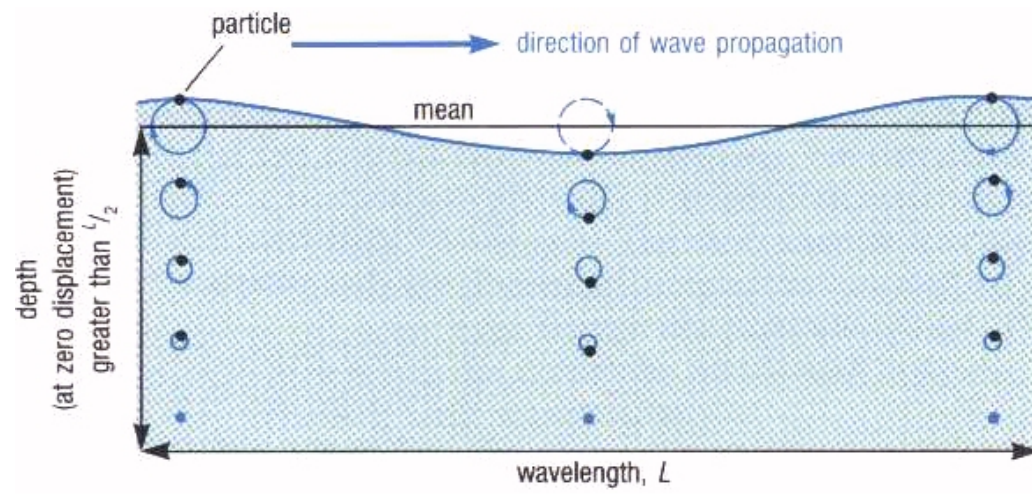
Mouvement de l'eau lors de la propagation d'onde de surface



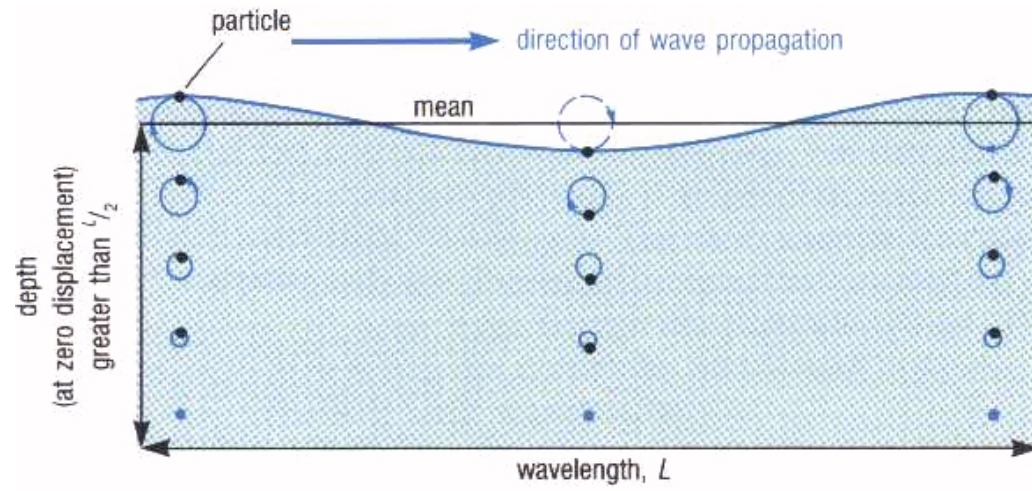
<https://www.youtube.com/watch?v=7yPTa8qi5X8>

Ondes de surface : ni transverses (lumière)
ni longitudinales (son)

- En eau profonde

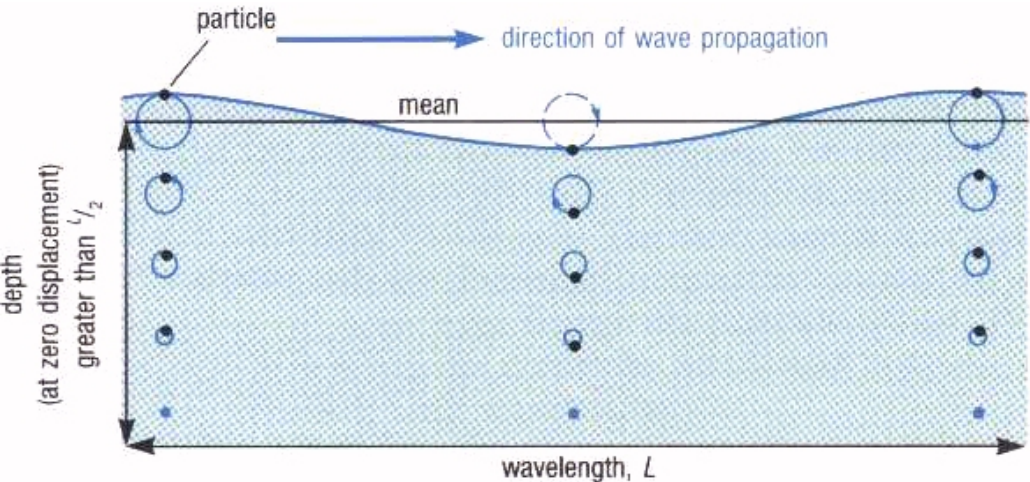


- En eau profonde

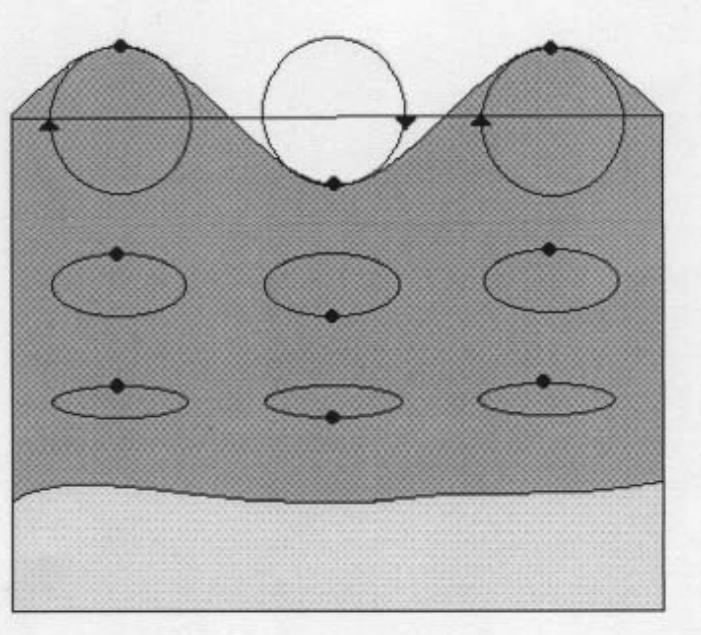


- En eau peu profonde ?

- En eau profonde



- En eau peu profonde



Ondes planes monochromatiques

=> Recherche de solutions en $A = A_0 \cos(kx - \omega t)$

Ondes planes monochromatiques

=> Recherche de solutions en $A = A_0 \cos(kx - \omega t)$

Cas des ondes en eau « profonde » ($\lambda \ll H$) :

Relation de dispersion $\omega(k)$: $\omega^2 = gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3$ (relation obtenue sous hypothèses de faible dissipation et faible amplitude)

Vitesse de phase ?

Ondes planes monochromatiques

=> Recherche de solutions en $A = A_0 \cos(kx - \omega t)$

Cas des ondes en eau « profonde » ($\lambda \gg H$) :

Relation de dispersion $\omega(k)$: $\omega^2 = gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3$ (relation obtenue sous hypothèses de faible dissipation et faible amplitude)

Vitesse de phase $c_\varphi(k) = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{g}{k} + \frac{\gamma}{\rho} k \right)^{1/2}$ ondes dispersives
(\neq son, lumière)

Ondes planes monochromatiques

=> Recherche de solutions en $A = A_0 \cos(kx - \omega t)$

Cas des ondes en eau « profonde » ($\lambda \gg H$) :

Relation de dispersion $\omega(k)$: $\omega^2 = gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3$ (relation obtenue sous hypothèses de faible dissipation et faible amplitude)

Vitesse de phase $c_\varphi(k) = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{g}{k} + \frac{\gamma}{\rho} k \right)^{1/2}$ ondes dispersives
(\neq son, lumière)

minimum de vitesse ?

Ondes planes monochromatiques

=> Recherche de solutions en $A = A_0 \cos(kx - \omega t)$

Cas des ondes en eau « profonde » ($\lambda \gg H$) :

Relation de dispersion $\omega(k)$: $\omega^2 = gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3$ (relation obtenue sous hypothèses de faible dissipation et faible amplitude)

Vitesse de phase $c_\varphi(k) = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{g}{k} + \frac{\gamma}{\rho} k \right)^{1/2}$ ondes dispersives
(\neq son, lumière)

vitesse minimum pour $k_c = \left(\frac{\rho g}{\gamma} \right)^{1/2} = 1/l_c$ l_c longueur capillaire
(cf chapitre capillarité)

Vitesse de groupe ?

Ondes planes monochromatiques

=> Recherche de solutions en $A = A_0 \cos(kx - \omega t)$

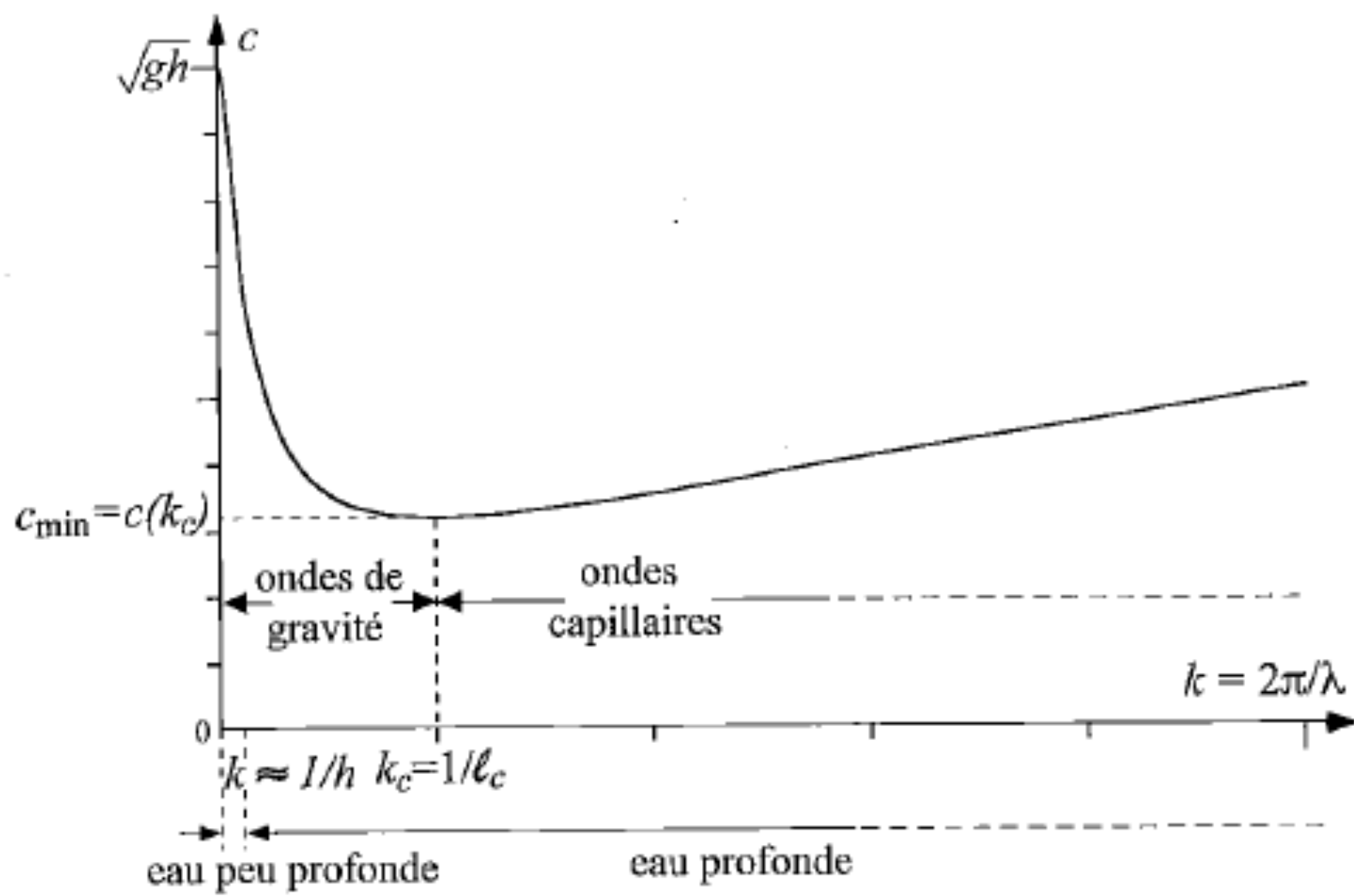
Cas des ondes en eau « profonde » ($\lambda \gg H$) :

Relation de dispersion $\omega(k)$: $\omega^2 = gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3$ (relation obtenue sous hypothèses de faible dissipation et faible amplitude)

Vitesse de phase $c_\varphi(k) = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{g}{k} + \frac{\gamma}{\rho} k \right)^{1/2}$ ondes dispersives
(\neq son, lumière)

vitesse minimum pour $k_c = \left(\frac{\rho g}{\gamma} \right)^{1/2} = 1/l_c$ l_c longueur capillaire
(cf chapitre capillarité)

Vitesse de groupe $c_g(k) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2} \frac{g + \frac{3\gamma}{\rho} k^2}{\left(gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3 \right)^{1/2}}$



$$\omega^2 = gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3$$

Ondes de gravité ($\lambda > 2\pi l_c$, $k < 1/l_c$)
« la houle »

$$\omega^2 = gk$$

$$c_\varphi = \left(\frac{g}{k}\right)^{1/2} = (2\pi g\lambda)^{1/2}$$

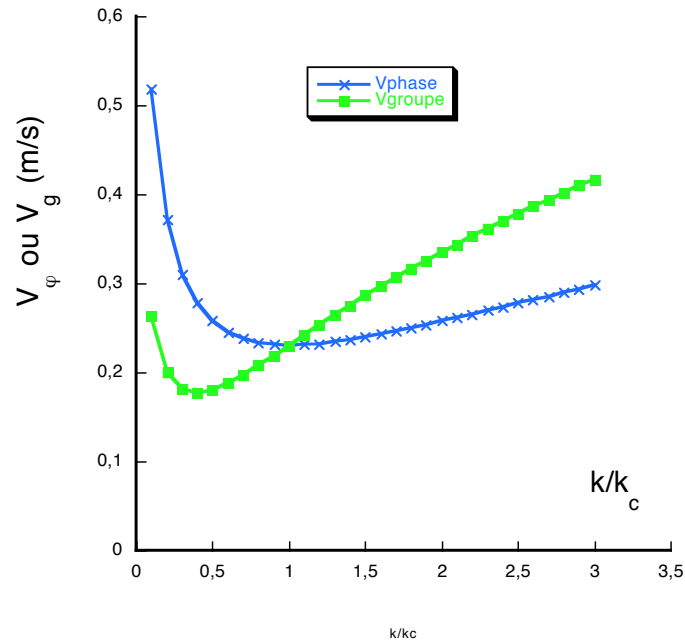
$$c_g = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{k}\right)^{1/2} = \left(\frac{\pi}{2} g\lambda\right)^{1/2}$$

Ondes capillaires ($\lambda < 2\pi l_c$, $k > 1/l_c$)
« les rides »

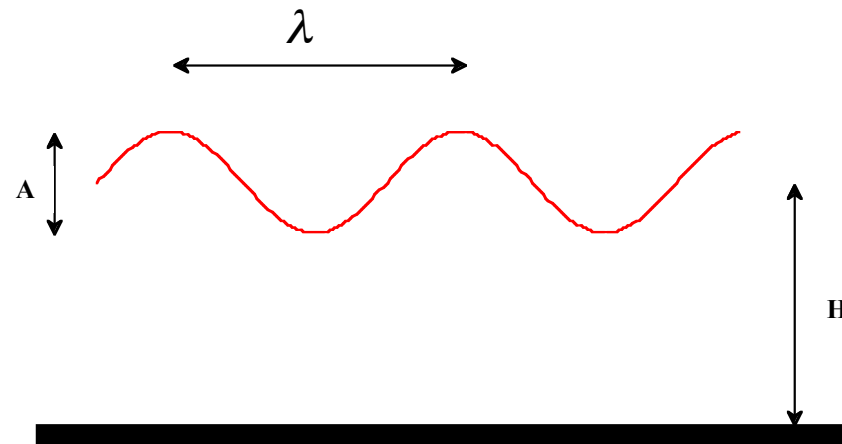
$$\omega^2 = \frac{\gamma}{\rho} k^3$$

$$c_\varphi = \left(\frac{\gamma}{\rho} k\right)^{1/2} = \left(\frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda}\right)^{1/2}$$

$$c_\varphi = \frac{3}{2} \left(\frac{\gamma}{\rho} k\right)^{1/2} = \left(\frac{9\pi\gamma}{2\rho\lambda}\right)^{1/2}$$



Cas des ondes en eau « peu profonde » ($\lambda > H$) :



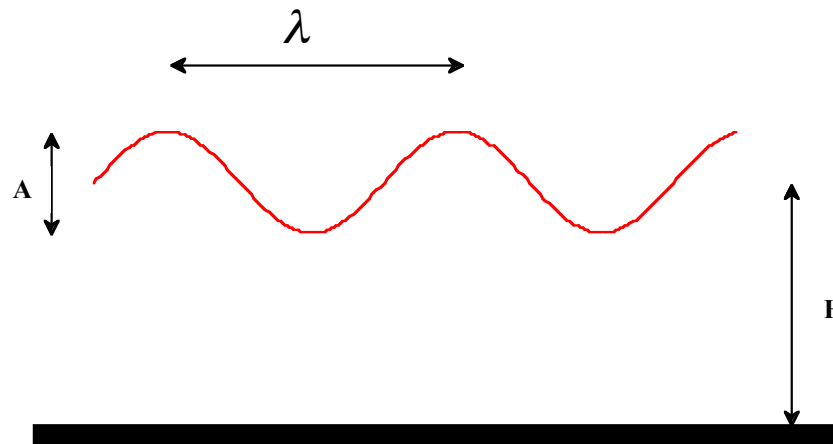
Relation de dispersion :

$$\omega^2 = gHk^2$$

(relation obtenue sous hypothèses de faible dissipation et faible amplitude)

vitesse ?

Cas des ondes en eau « peu profonde » ($\lambda > H$) :



Relation de dispersion :

$$\omega^2 = gHk^2$$

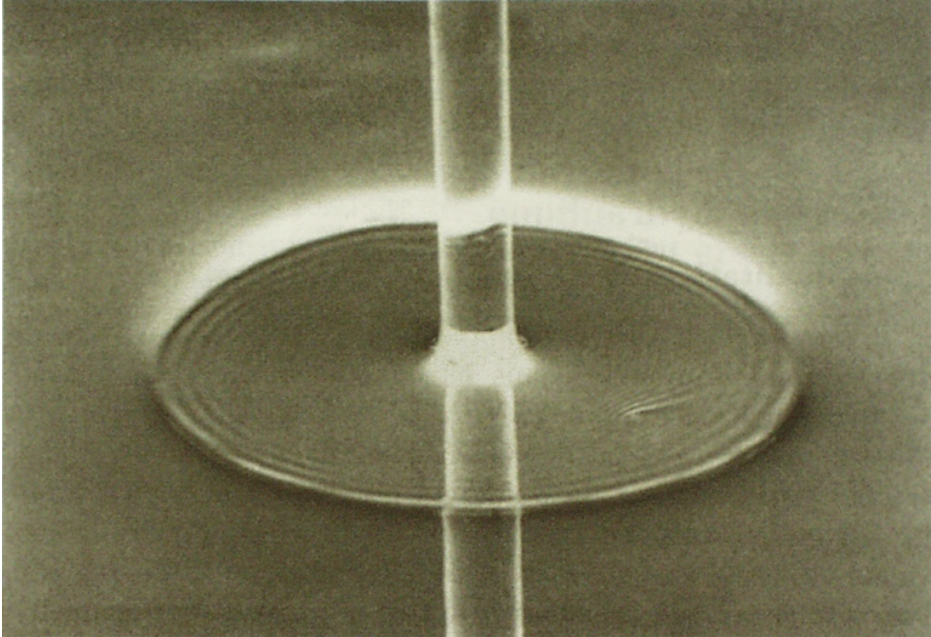
(relation obtenue sous hypothèses de faible dissipation et faible amplitude)

$$c_\varphi = c_g = (gH)^{1/2}$$

ondes non dispersives
(comme son et lumière)

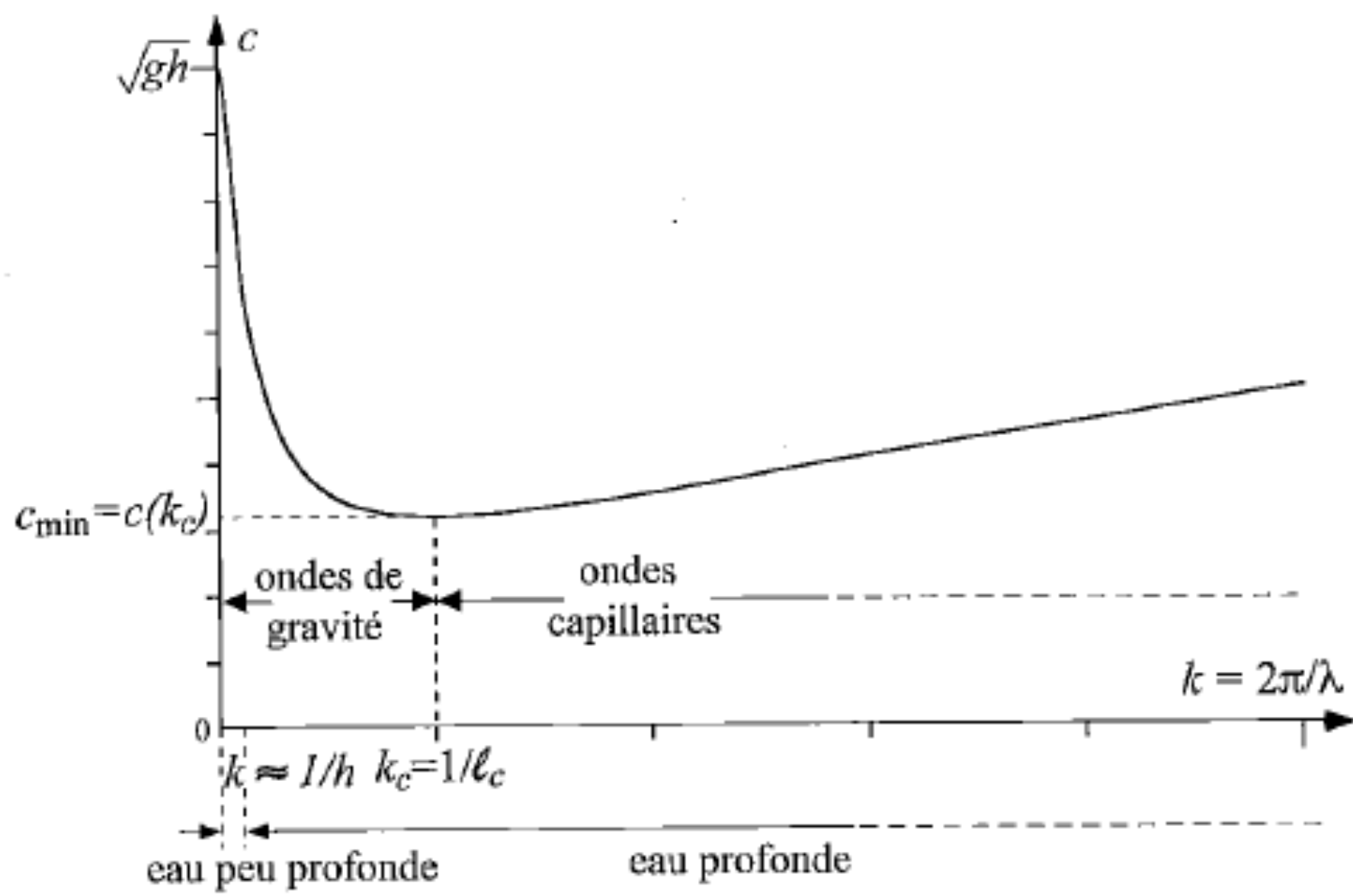
Cas des tsunامي, mascaret, onde de marée, ressaut hydraulique, mascaret, soliton

ressaut hydraulique
« mur du son » hydrodynamique



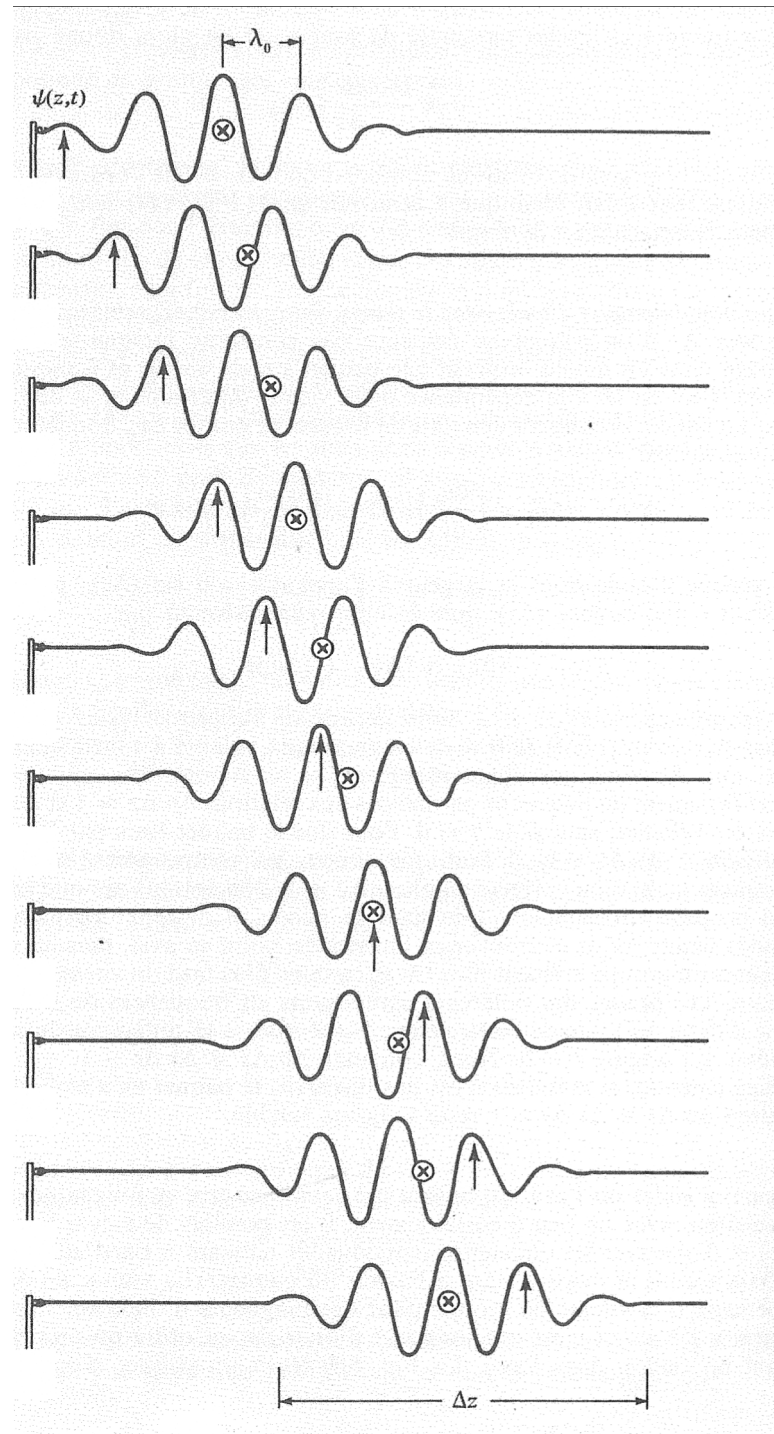
mascaret





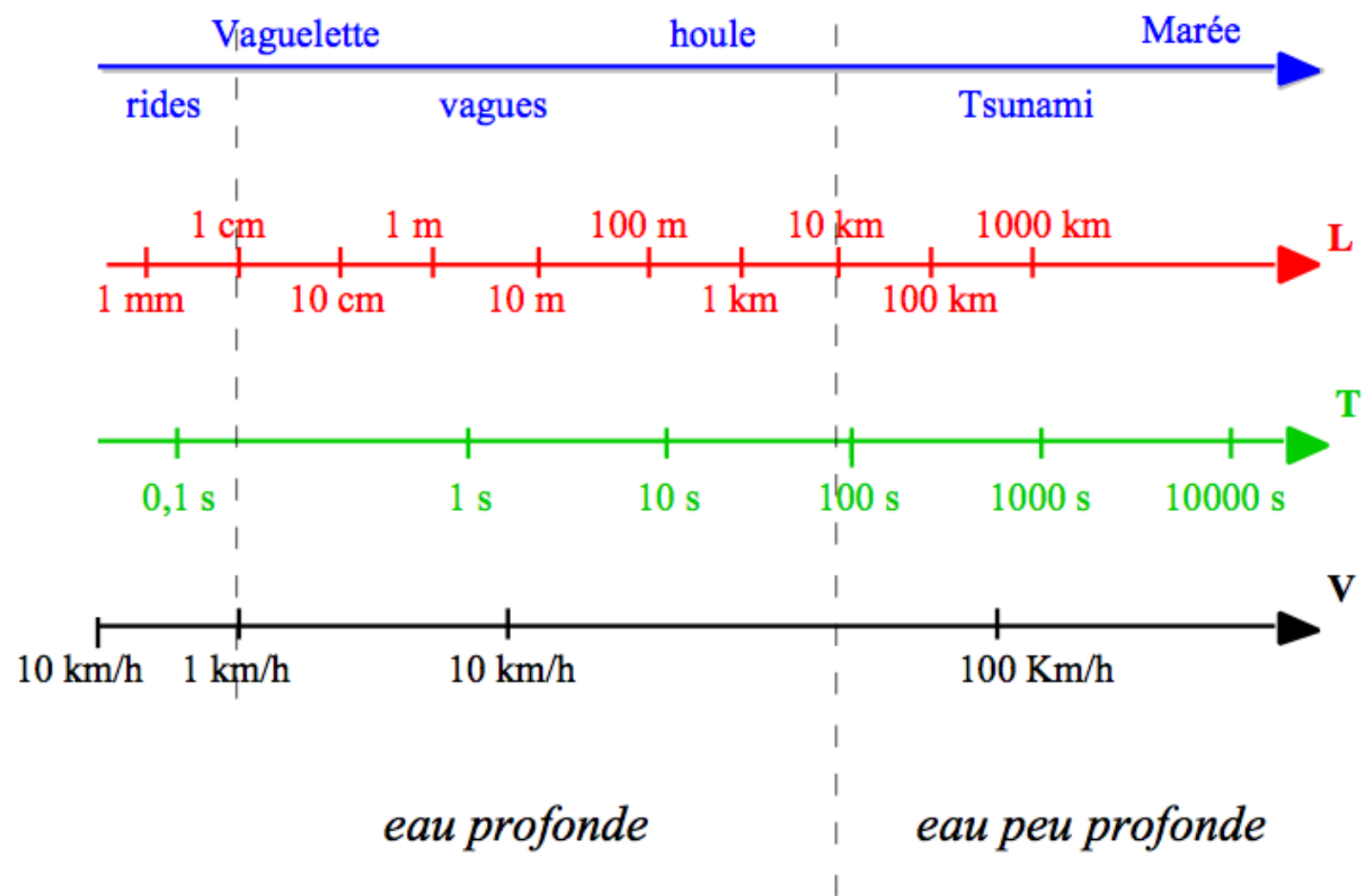
Exemple d'évolution d'un
paquet d'onde pour des ondes
de gravité en eau profonde

$$c_g = 1/2 c_\varphi$$



ondes capillaires

ondes de gravité



Pourquoi les vagues arrivent toujours perpendiculairement à la plage ?



Pourquoi les vagues arrivent toujours perpendiculairement à la plage ?



Ce phénomène est due au lien entre la vitesse des vagues avec la hauteur d'eau : la vitesse diminuant avec la hauteur d'eau la direction de propagation se rapproche du gradient de hauteur

Ceci correspond donc à de la réfraction en eau peu profonde comme l'effet mirage en optique

Diffraction par une ouverture ou un obstacle (Principe de Huygens)

$$\lambda \approx d$$



Port d'Alexandrie (Egypte)



Interférences par deux fentes (Principe de Huygens)



Pour en savoir plus



Chapitre "Les vagues"
par Marc Rabaud
Prof. Univ. Paris-Sud
Laboratoire FAST, Orsay