Ondes & Cosmos

optique, thermodynamique, gravitation


L'interféromètre ALMA

Explorer les liens qui existent entre les phénomènes ondulatoires, des plus petites échelles (atomes, photons, ..) aux plus grandes (le cosmos)

- Cours 1 : Les ondes c'est quoi ..?
  ✓26 avril @ 18h15
- Cours 2 : Les ondes et la thermodynamique
  ✓3 mai @ 18h15
- Cours 3 : Le cosmos et la gravitation
  ✓10 mai @ 18h15



Christian Boily / Observatoire de Strasbourg / 26 avril 2022 18h15 - 19h45 Amphi Fresnel

Ondes & Cosmos
Contenu, objectifs


L’interféromètre ALMA

- Explorer les liens qui existent entre les phénomènes ondulatoires, des plus petites échelles (atomes, photons, ..) aux plus grandes (le cosmos)
- Cours 1 : Les ondes c’est quoi ?
  - ✓ Définition et exemples : le son, interférences, explosion (choc) ..
  - ✓ La lumière (électromagnétisme), ses composantes, son spectre, ~~le laser~~ paquet d’ondes
  - ✓ Onde de probabilité : la mécanique quantique (Schrödinger) et ses conséquences
  - ✓ Particules et ondes : la dualité du monde
  - ✓ 26 avril @ 18h15

Les ondes : définition intuitive

Mouvement périodique & principe de superposition

- *Wiki* En physique, en mathématiques et dans les domaines connexes, une onde est une **perturbation dynamique** qui se propage (par changement de l'état d'équilibre d'une ou de plusieurs quantités) dans un milieu, parfois décrite par une **équation d'onde**. Pour les ondes physiques, au moins deux quantités de champ dans le milieu d'onde sont impliquées.
- On pense par exemple à un piston (qui modifie la densité et pression d'un fluide), le pincement d'un instrument à corde (guitare, ..) pour une onde sonore, ..
- Un tremblement de Terre (ou d'étoile)

Onde comme perturbation

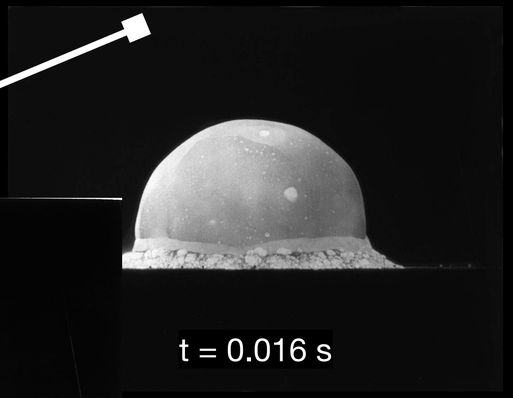
les cas extrèmes : **fortes**, faibles

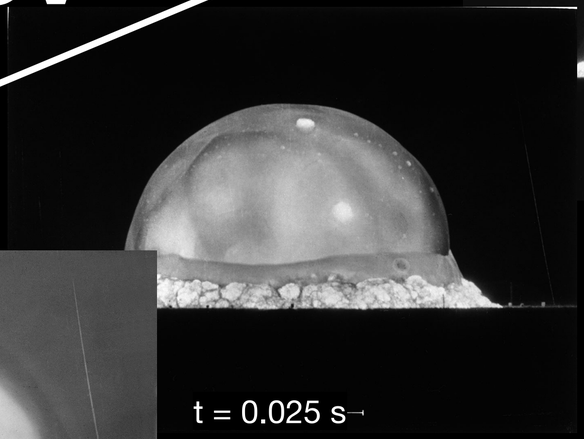
- la détonation, explosion : onde de choc
  - événement unique, forte amplitude de déplacement (bcp d'énergie) ;
  - Exemple : solution de Taylor-Sédov (voir aussi J. von Neumann)
- Perturbation de faible amplitude : retour vers l'état d'équilibre
  - équilibre stable
  - mouvement périodique (exemple : le pendule)

Choc : solution Taylor-Sedov

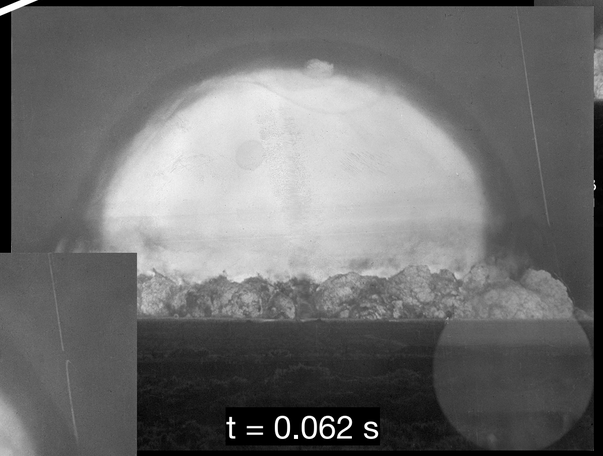
Expérience Trinity, Los Alamos
15 juillet 1945

Choc v ~ 5 km / s

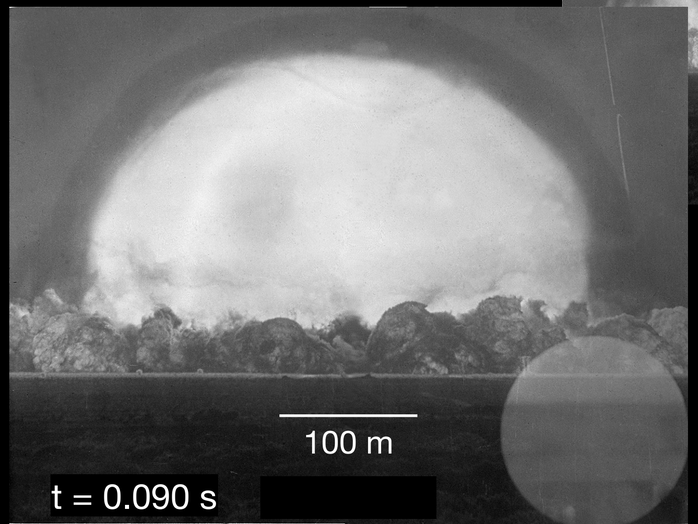


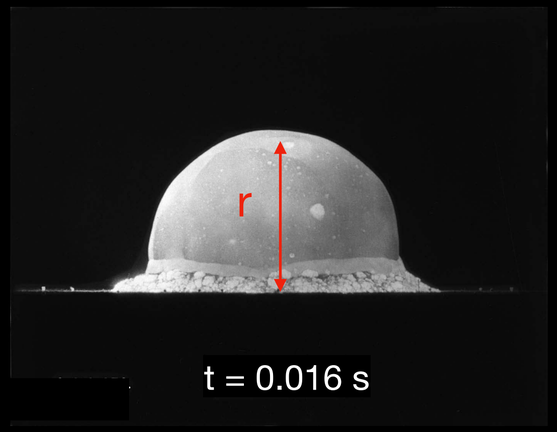


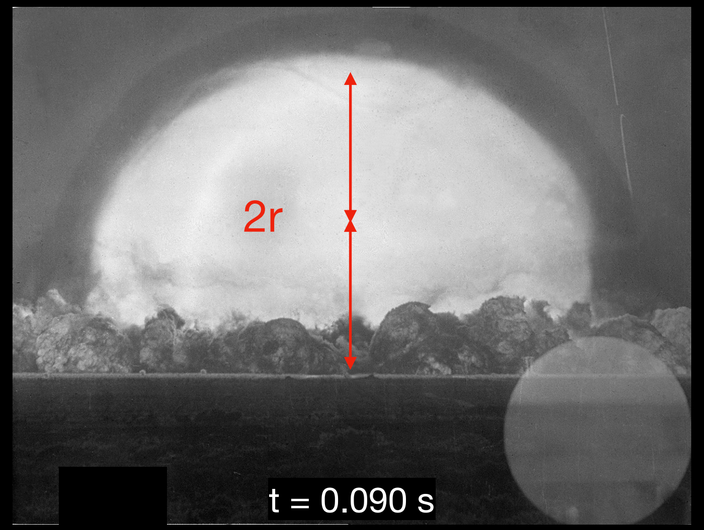




$r(t) \sim t^{2/5}$



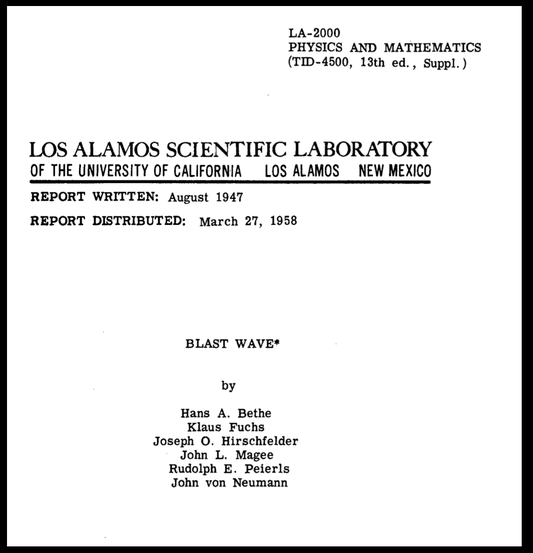




Choc : solution Taylor-Sedov

Contribution de v. Neumann 1947

Chapter 2	THE POINT SOURCE SOLUTION, by John von Neumann	27
	2.1 Introduction	27
	2.2 Analytical Solution of the Problem	30
	2.3 Evaluation and Interpretation of the Results	46



LA-2000
PHYSICS AND MATHEMATICS
(TID-4500, 13th ed., Suppl.)

LOS ALAMOS SCIENTIFIC LABORATORY
OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA LOS ALAMOS NEW MEXICO

REPORT WRITTEN: August 1947

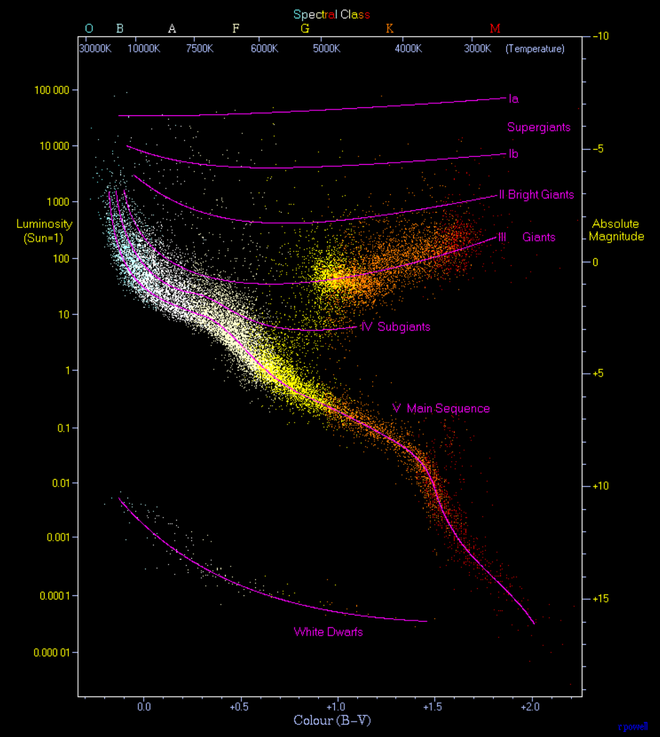
REPORT DISTRIBUTED: March 27, 1958

BLAST WAVE*

by

Hans A. Bethe
Klaus Fuchs
Joseph O. Hirschfelder
John L. Magee
Rudolph E. Peierls
John von Neumann

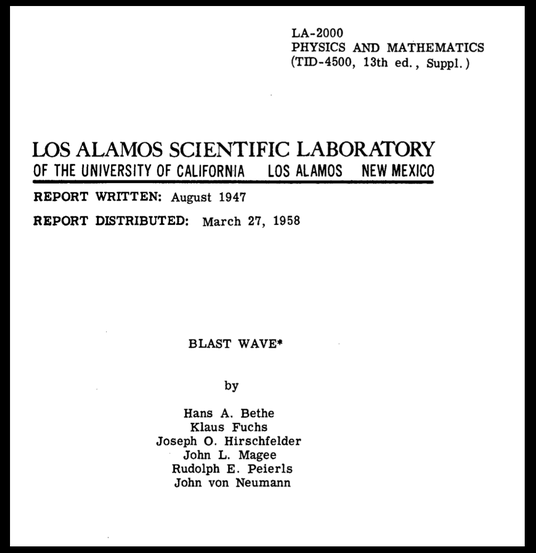
- Une onde de choc astrophysique : les étoiles Super Novae (SN)
- Optique : HST le Crabe (SN 1054), pulsar en son centre, réverbération
- Chandra X : SN R0103-72.6
- voir ex Simbad (basique, identifiant)



Choc : solution Taylor-Sedov

Contribution de v. Neumann 1947

Chapter 2	THE POINT SOURCE SOLUTION, by John von Neumann	27
	2.1 Introduction	27
	2.2 Analytical Solution of the Problem	30
	2.3 Evaluation and Interpretation of the Results	46



LA-2000
PHYSICS AND MATHEMATICS
(TID-4500, 13th ed., Suppl.)

LOS ALAMOS SCIENTIFIC LABORATORY
OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA LOS ALAMOS NEW MEXICO

REPORT WRITTEN: August 1947

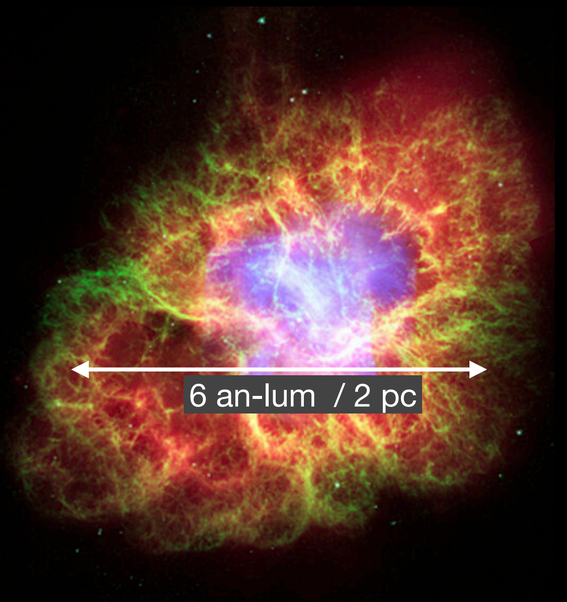
REPORT DISTRIBUTED: March 27, 1958

BLAST WAVE*

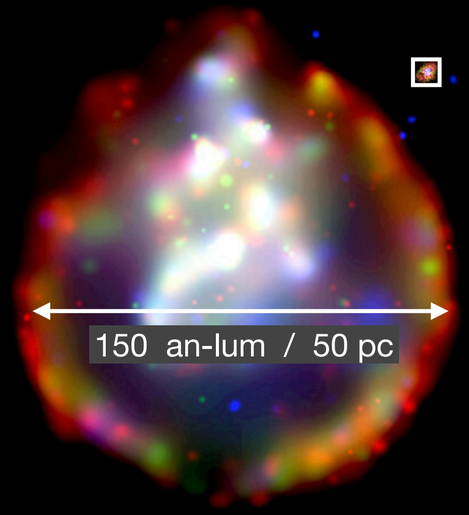
by

Hans A. Bethe
Klaus Fuchs
Joseph O. Hirschfelder
John L. Magee
Rudolph E. Peierls
John von Neumann

- Une onde de choc astrophysique : les étoiles Super Novae (SN)
- Optique : HST le Crabe (SN 1054), pulsar en son centre, réverbération
- Chandra X : SN R0103-72.6
- voir ex Simbad (basique, identifiant)



Optique

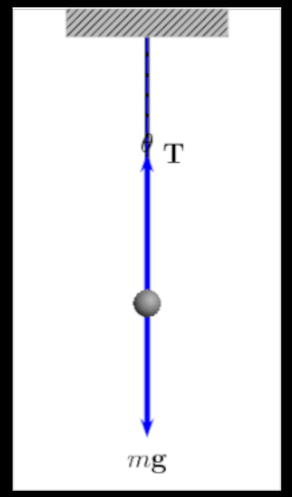


Rayons X

Onde comme perturbation

les cas extrèmes : fortes, **faibles**

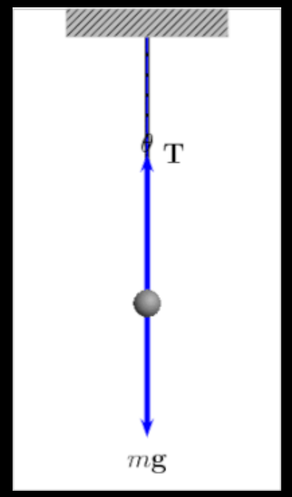
- la détonation, explosion : onde de choc
  - événement unique, forte amplitude de déplacement (bcp d'énergie) ;
  - Exemple : solution de Taylor-Sédov
- Perturbation de faible amplitude : retour vers l'état d'équilibre
  - équilibre stable, les cas plus souvent rencontrés / étudiés
  - mouvement périodique (exemple : le pendule)



Onde comme perturbation

les cas extrèmes : fortes, **faibles**

- la détonation, explosion : onde de choc
  - événement unique, forte amplitude de déplacement (bcp d'énergie) ;
  - Exemple : solution de Taylor-Sédov
- Perturbation de faible amplitude : retour vers l'état d'équilibre
  - équilibre stable, les cas plus souvent rencontrés / étudiés
  - mouvement périodique (exemple : le pendule)

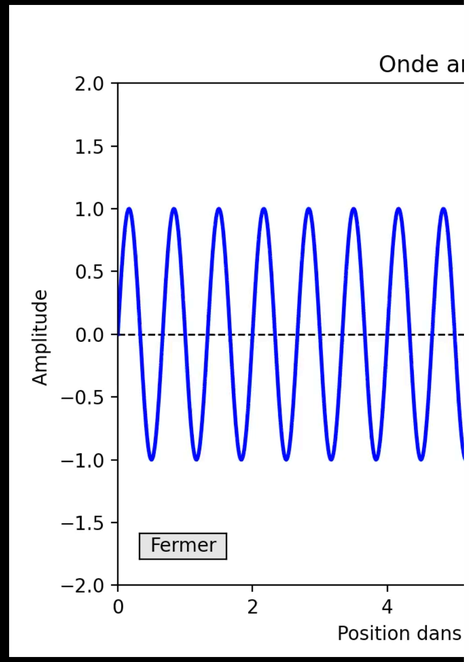


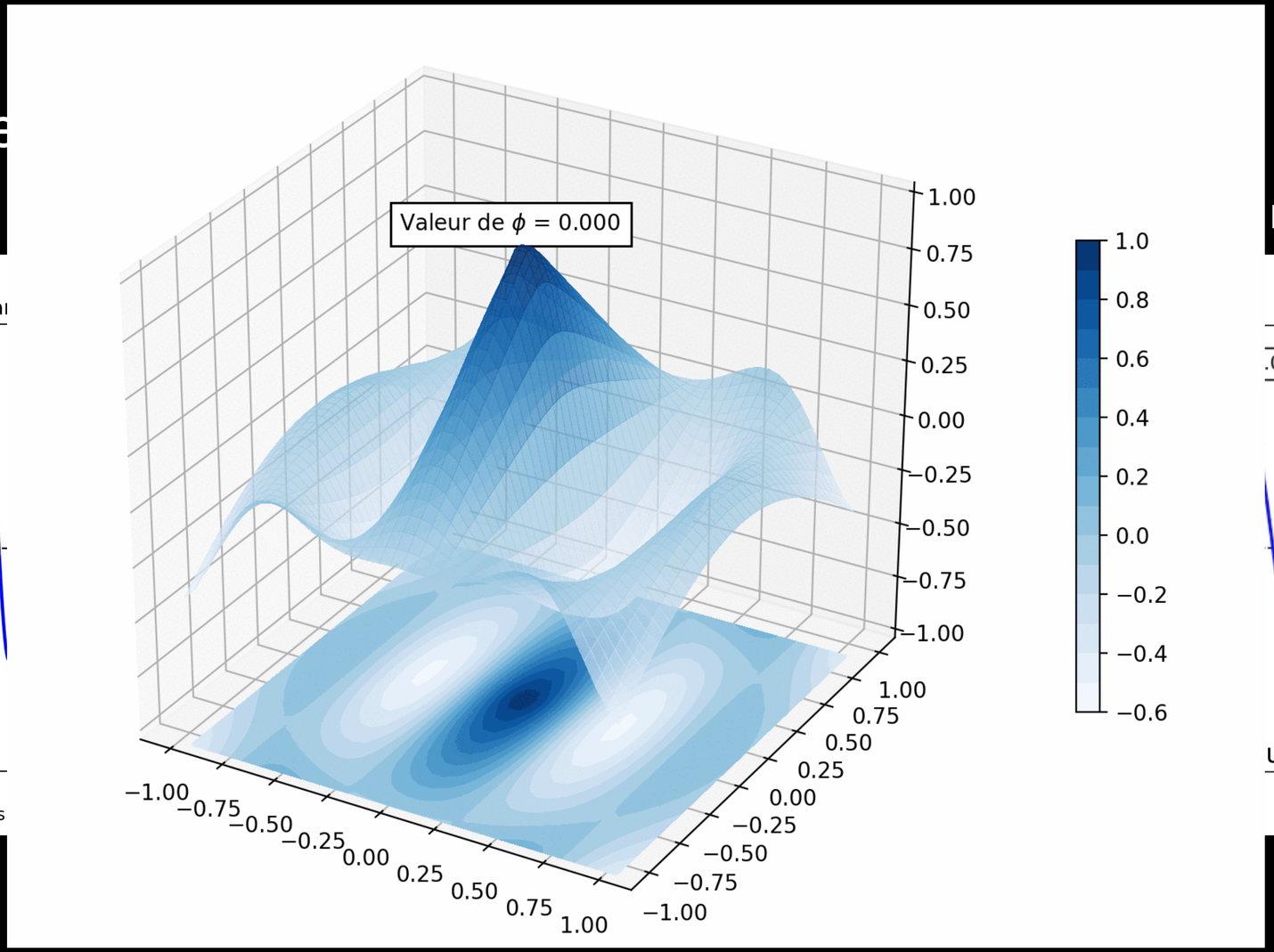
Onde comme perturbation

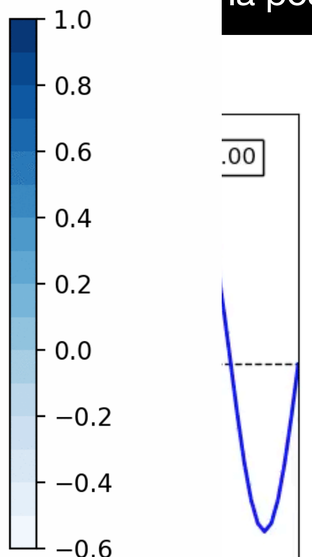
1. Mouvement périodique, avec / sans dissipation

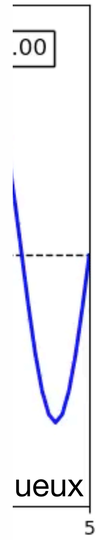
- Mode vibratoire investie

la position d'équilibre :







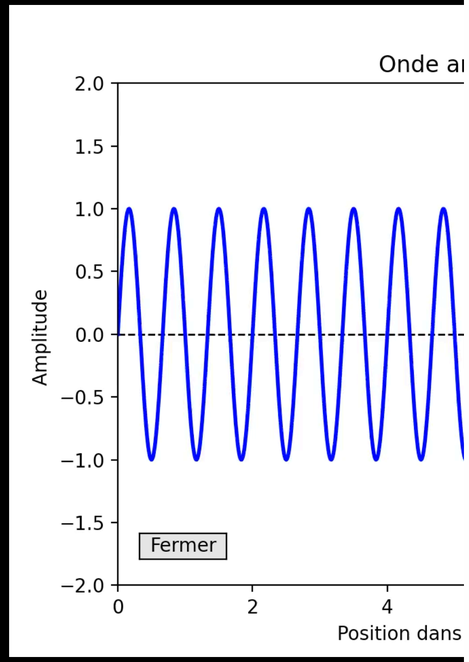


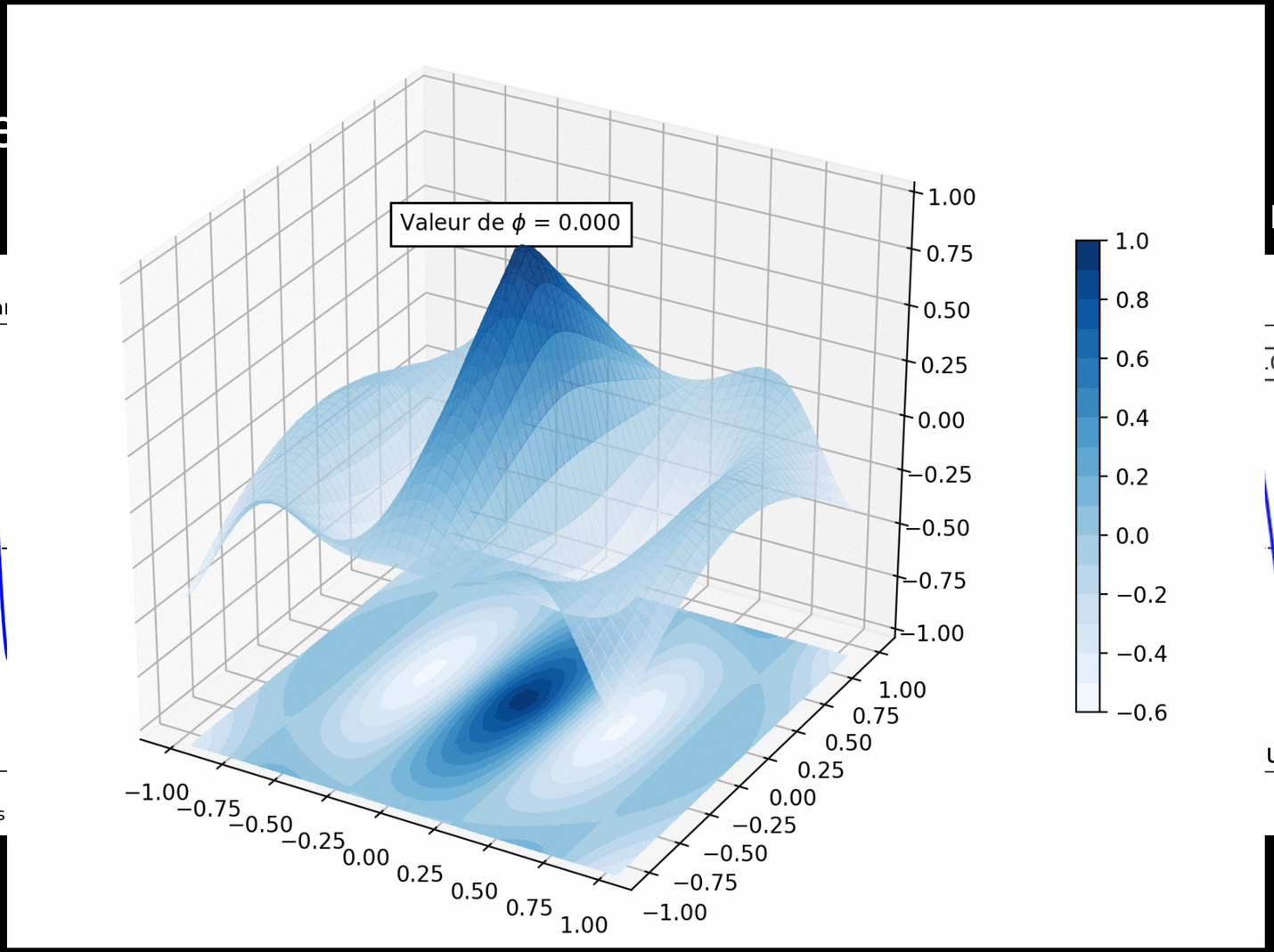
Onde comme perturbation

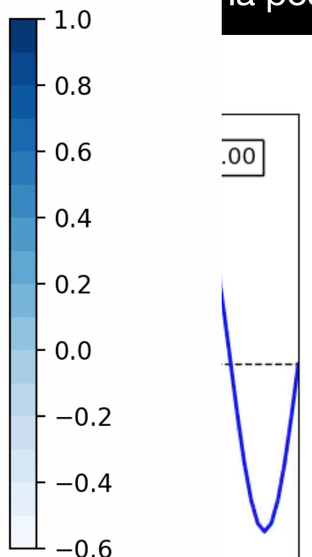
1. Mouvement périodique, avec / sans dissipation

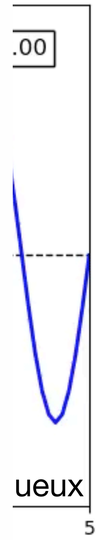
- Mode vibratoire investie

la position d'équilibre :





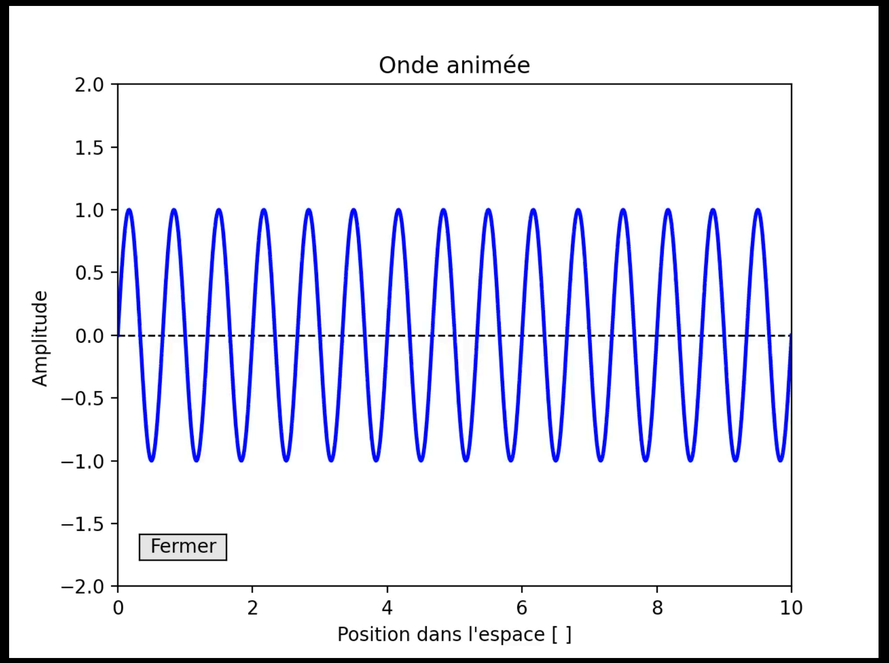




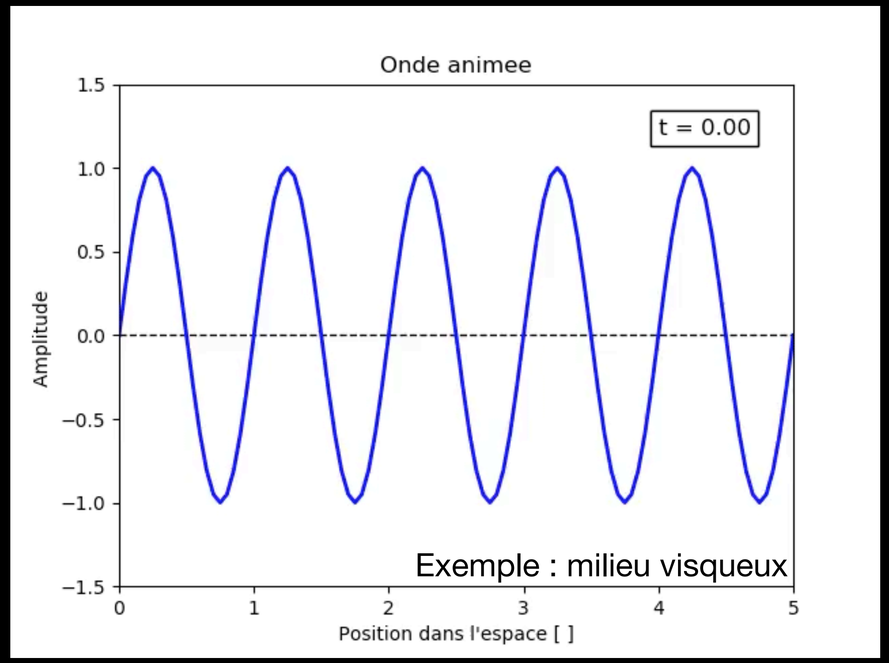
Onde comme perturbation

1. Mouvement périodique, avec / sans dissipation

- Mode vibratoire pur, sans atténuation : conservation de l’énergie investie



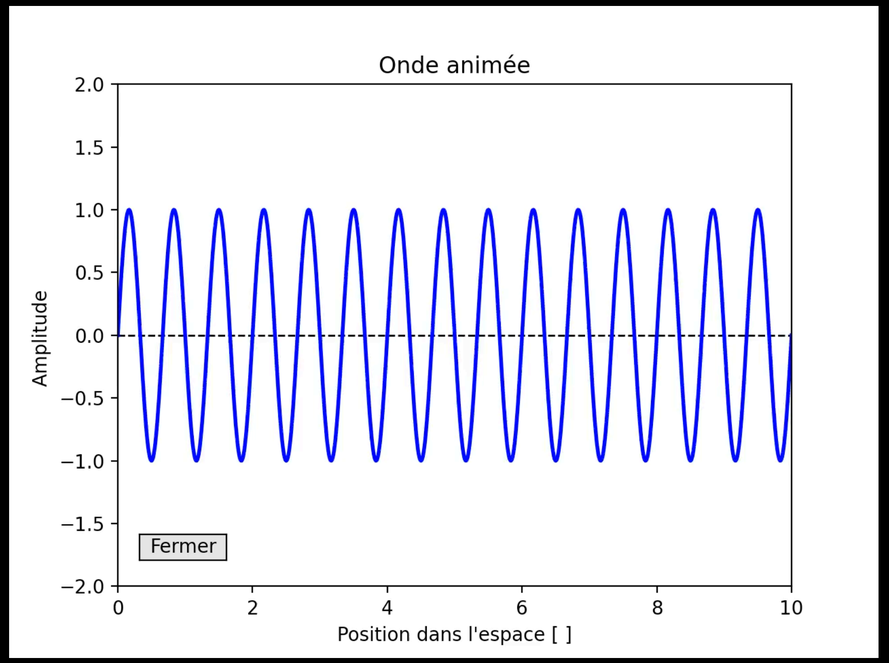
avec dissipation : retour à la position d’équilibre :



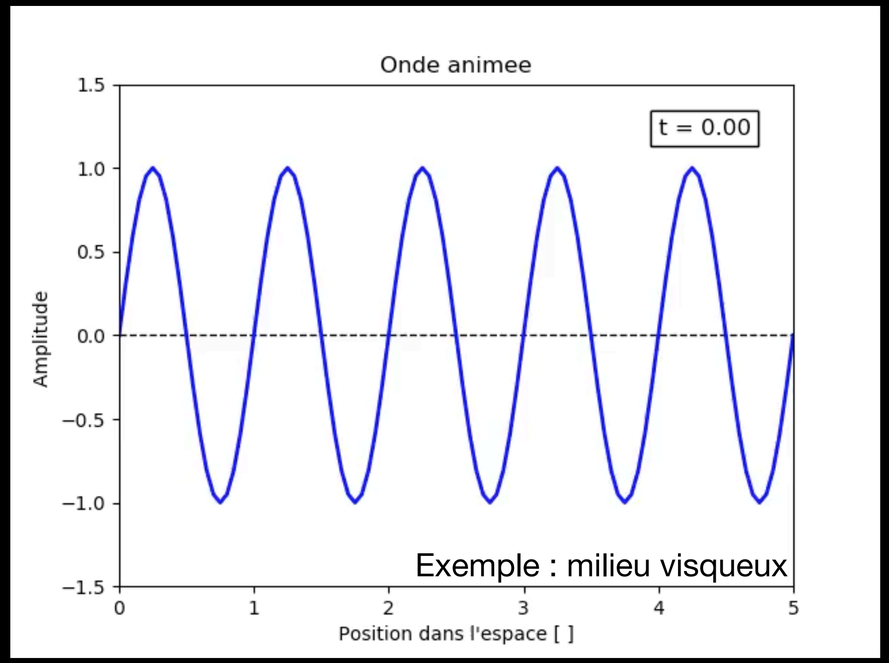
Onde comme perturbation

1. Mouvement périodique, avec / sans dissipation

- Mode vibratoire pur, sans atténuation : conservation de l’énergie investie



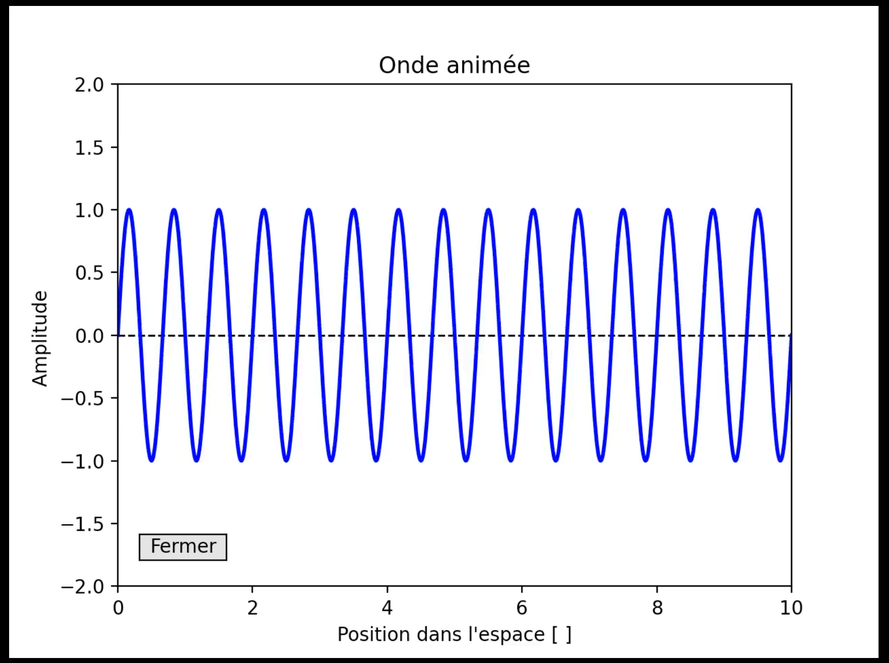
avec dissipation : retour à la position d’équilibre :



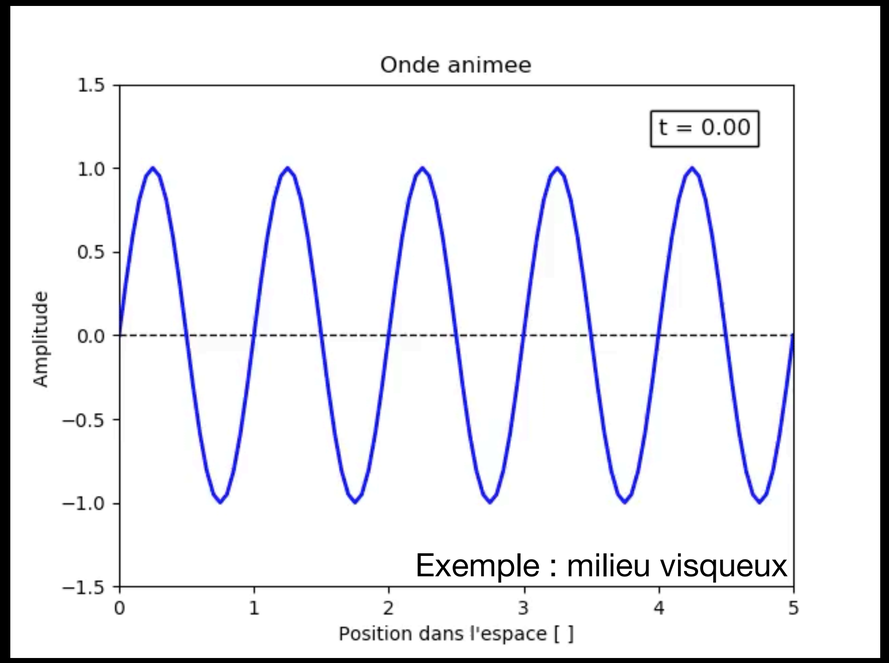
Onde comme perturbation

1. Mouvement périodique, avec / sans dissipation

- Mode vibratoire pur, sans atténuation : conservation de l’énergie investie

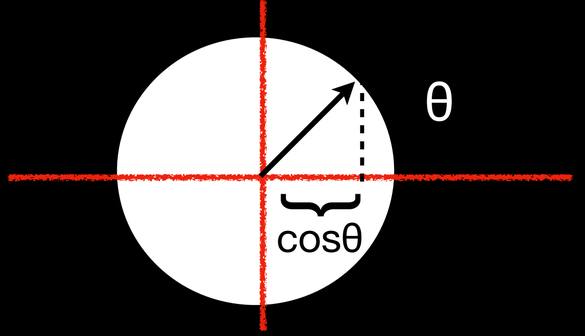


avec dissipation : retour à la position d’équilibre :

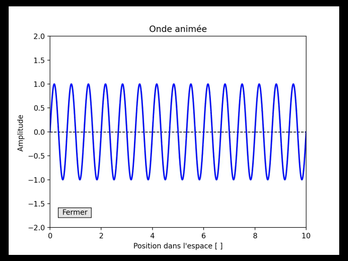


Onde comme perturbation

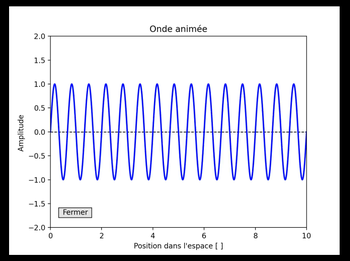
2. le principe de superposition



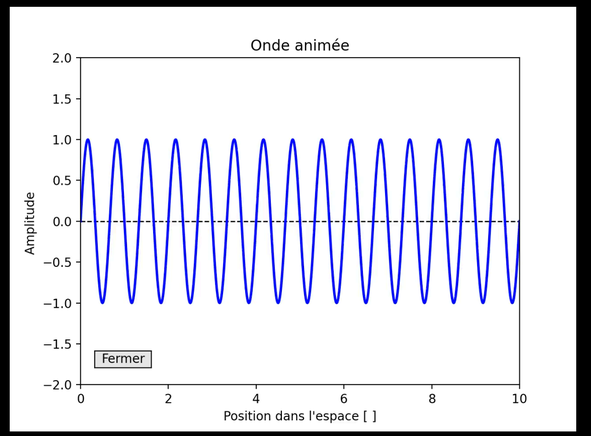
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples : sinus, cosinus
- Fonction périodique pour une révolution $\theta = \pm 2\pi$ sur tout l'axe réel ($\pm \infty$)



+



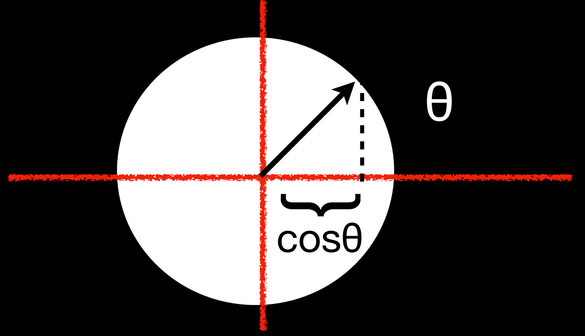
=



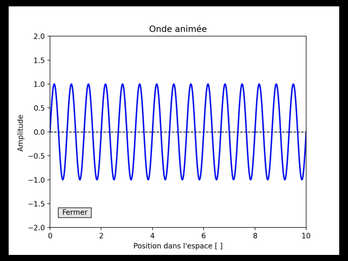
2 x l'amplitude
(constructif)

Onde comme perturbation

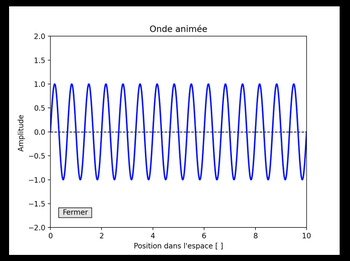
2. le principe de superposition



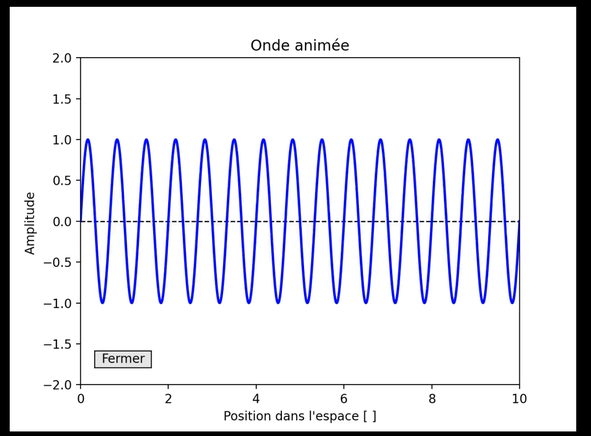
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples : sinus, cosinus
- Fonction périodique pour une révolution $\theta = \pm 2\pi$ sur tout l'axe réel ($\pm \infty$)



+



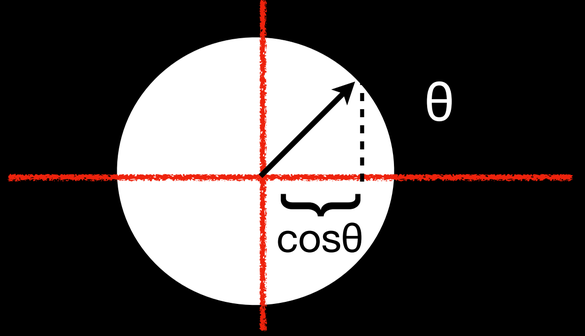
=



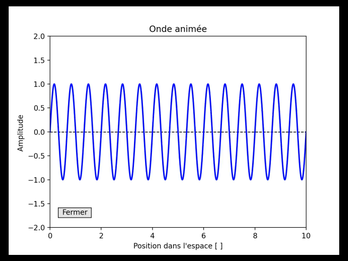
2 x l'amplitude
(constructif)

Onde comme perturbation

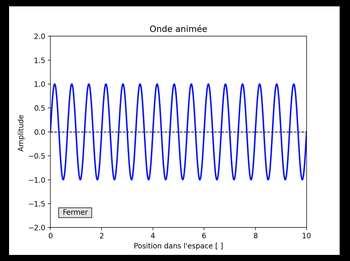
2. le principe de superposition



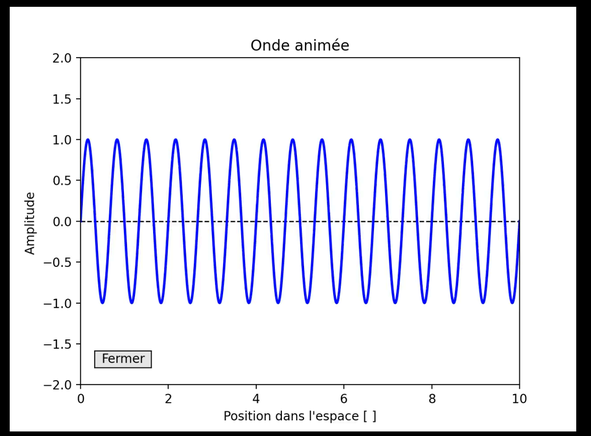
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples : sinus, cosinus
- Fonction périodique pour une révolution $\theta = \pm 2\pi$ sur tout l'axe réel ($\pm \infty$)



+



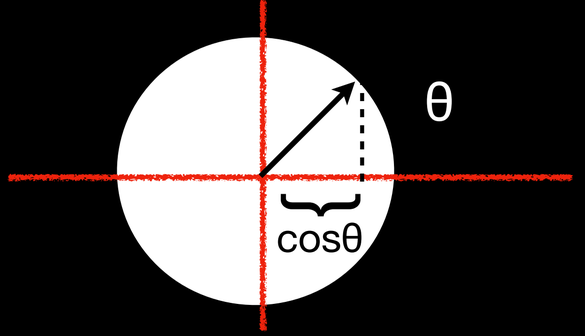
=



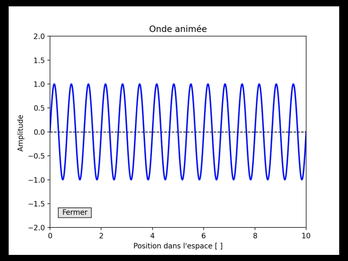
2 x l'amplitude
(constructif)

Onde comme perturbation

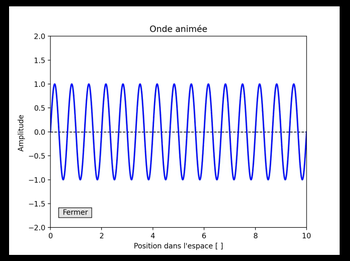
2. le principe de superposition



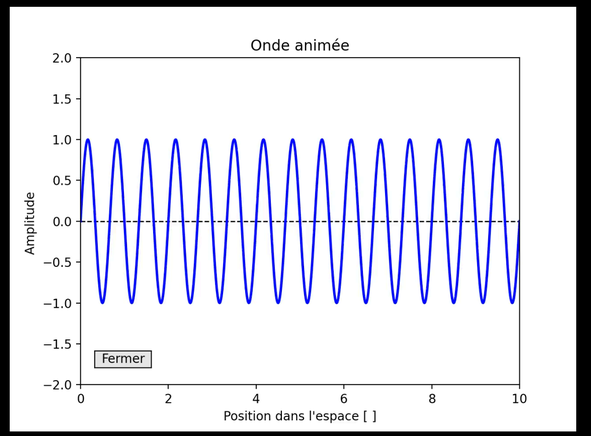
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples : sinus, cosinus
- Fonction périodique pour une révolution $\theta = \pm 2\pi$ sur tout l'axe réel ($\pm \infty$)



+



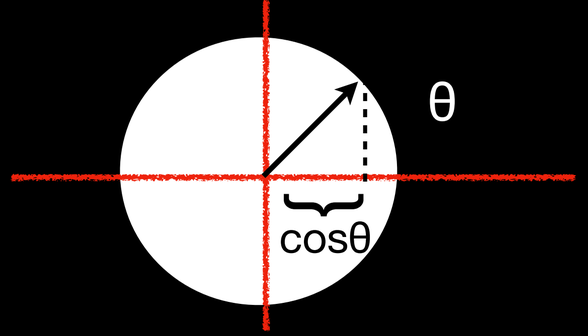
=



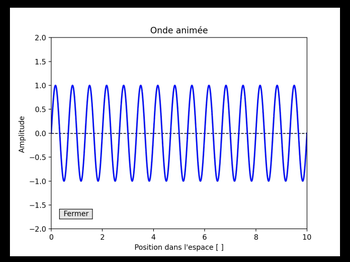
2 x l'amplitude
(constructif)

Onde comme perturbation

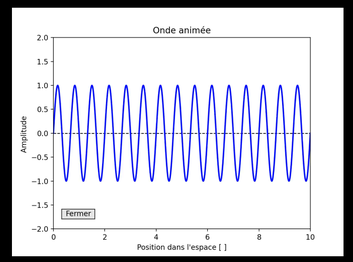
2. le principe de superposition



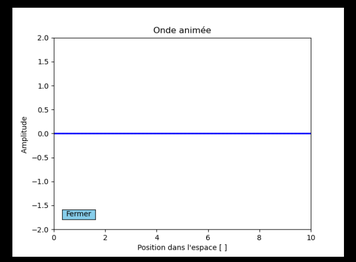
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples
- La superposition (±) permet de moduler l'amplitude nette du signal étudié



-



=

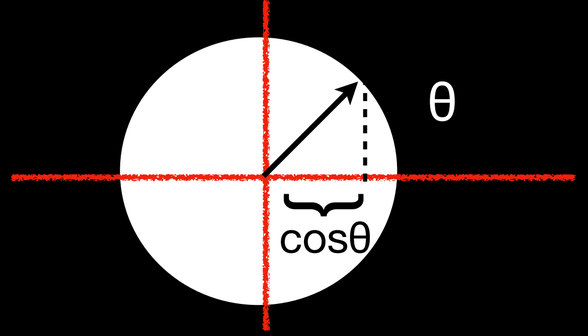


amplitude = 0 (destructif)

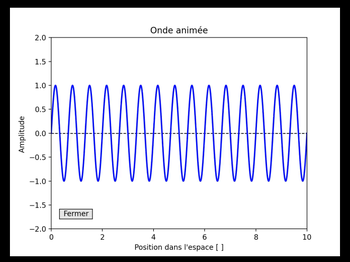
On soustrait le signal en phase

Onde comme perturbation

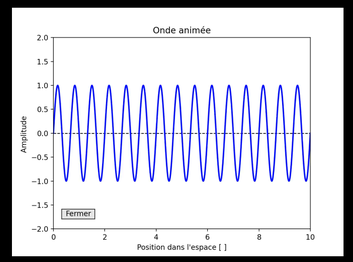
2. le principe de superposition



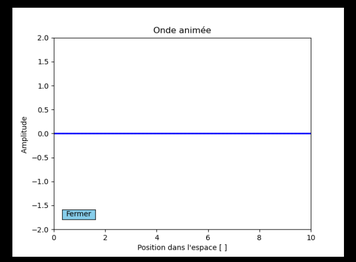
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples
- La superposition (±) permet de moduler l'amplitude nette du signal étudié



-



=

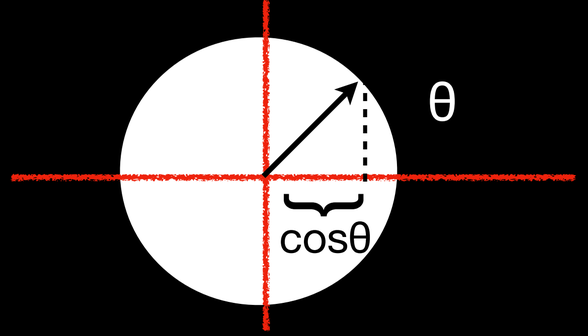


amplitude = 0 (destructif)

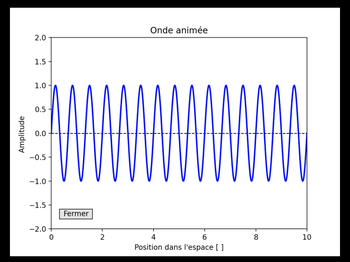
On soustrait le signal en phase

Onde comme perturbation

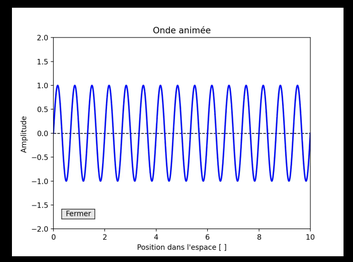
2. le principe de superposition



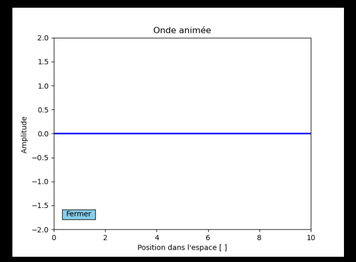
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples
- La superposition (±) permet de moduler l'amplitude nette du signal étudié



-



=

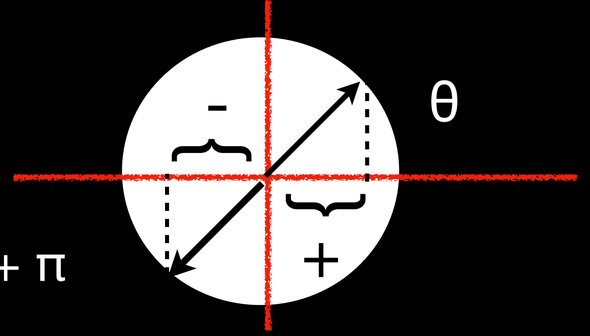


amplitude = 0 (destructif)

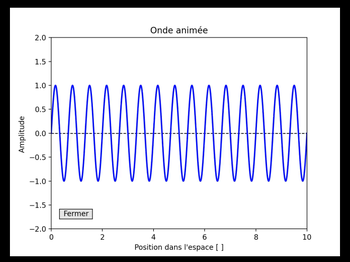
On soustrait le signal en phase

Onde comme perturbation

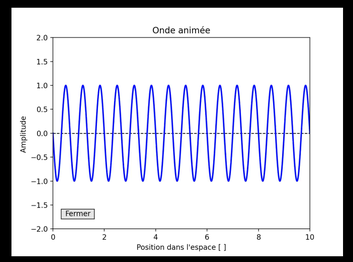
2. le principe de superposition



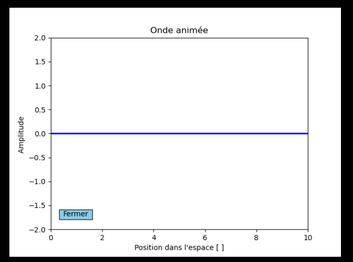
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples



+



=

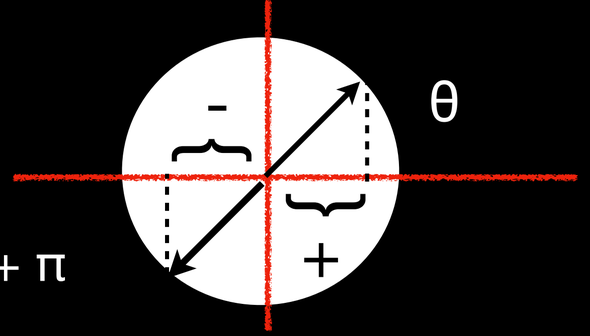


amplitude = 0 (destructif)

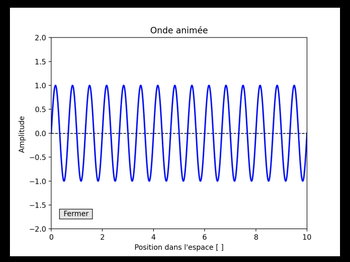
On additionne le signal en anti-phase

Onde comme perturbation

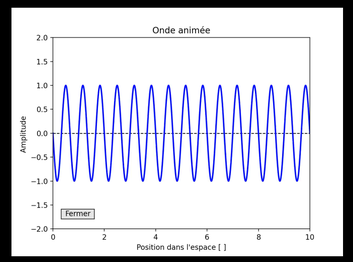
2. le principe de superposition



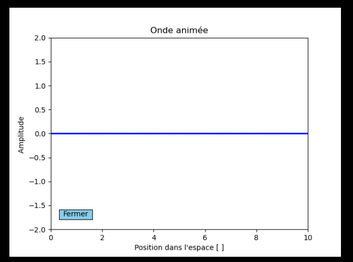
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples



+



=

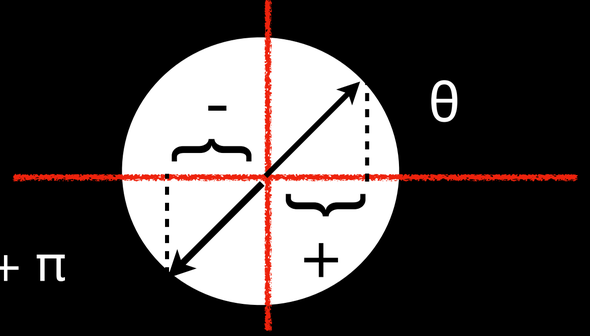


amplitude = 0 (destructif)

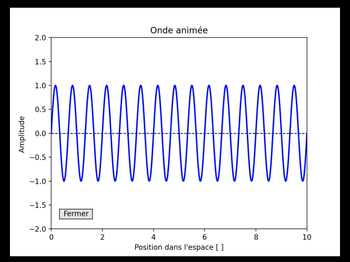
On additionne le signal en anti-phase

Onde comme perturbation

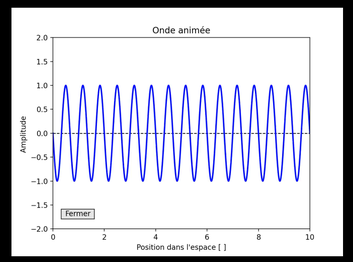
2. le principe de superposition



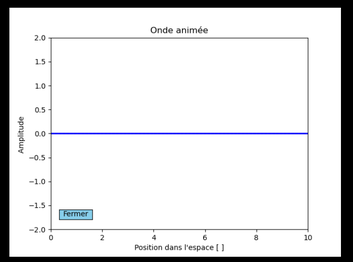
- Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) : mathématicien et physicien
- Les fonctions trigonométriques comme base pour décomposer une image, un signal … **base orthonormée** : $f(x,t) = \sum a_k \cos (\kappa x - w t)$
- Un signal complexe vu comme la somme de fonctions simples



+



=



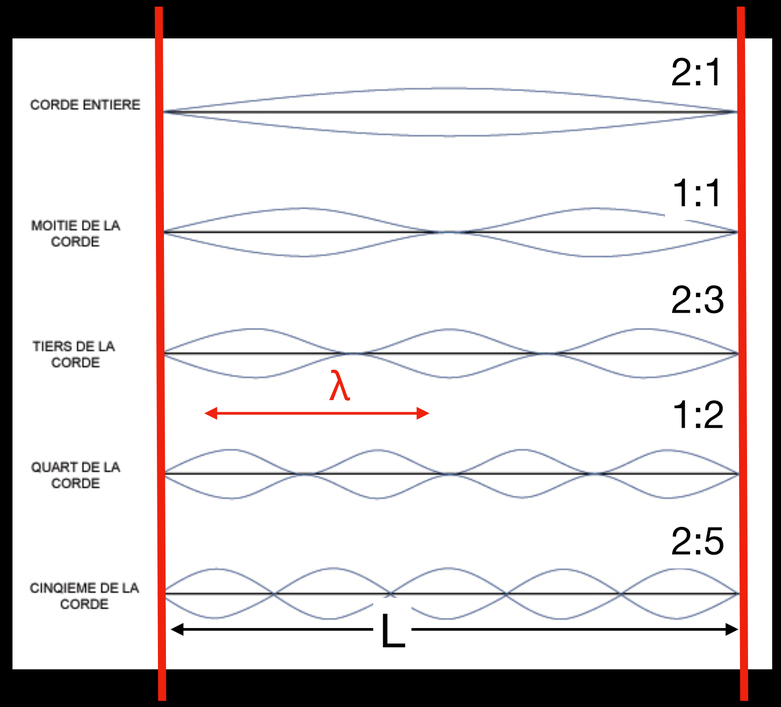
amplitude = 0 (destructif)

On additionne le signal en anti-phase

Onde comme perturbation

3. Modes propres, ondes stationnaires

- Mouvement dans une cavité, contraintes sur le mouvement : réflexion
- Conditions aux bords typiques : amplitude = 0 (pincement d'une corde ..)



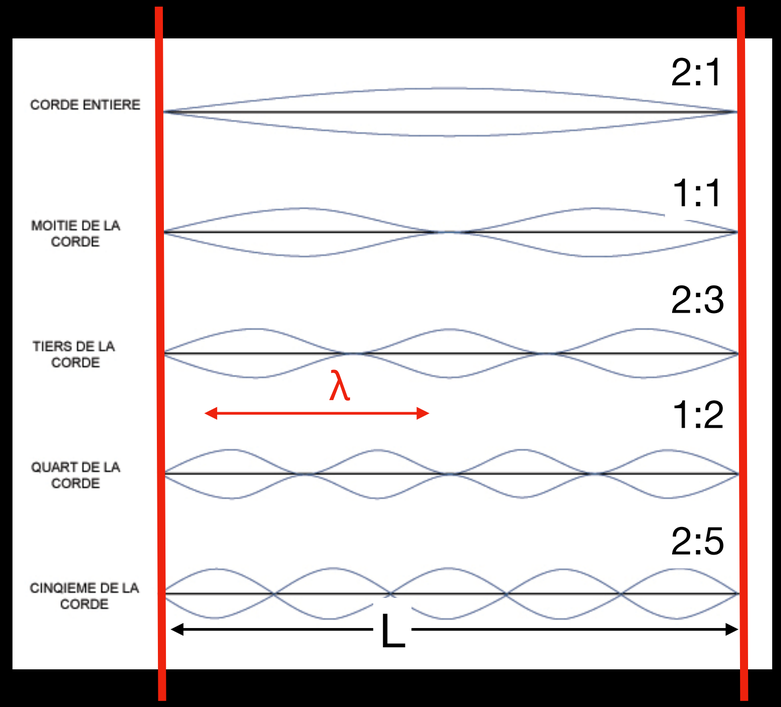


Un mode propre peut s'auto-entretenir si le domaine est périodique et L : λ = m : n ..

Onde comme perturbation

3. Modes propres, ondes stationnaires

- Mouvement dans une cavité, contraintes sur le mouvement : réflexion
- Conditions aux bords typiques : amplitude = 0 (pincement d'une corde ..)



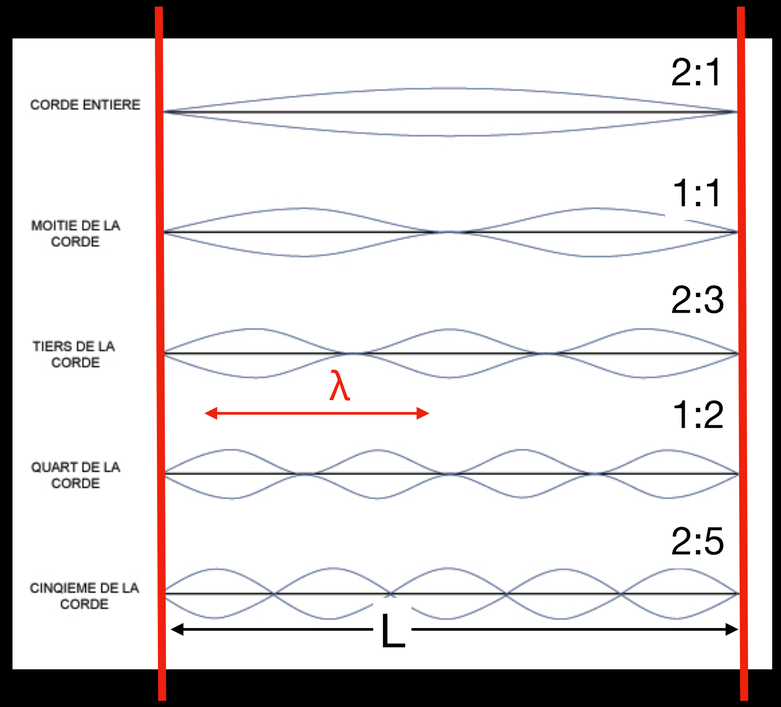


Un mode propre peut s'auto-entretenir si le domaine est périodique et L : λ = m : n ..

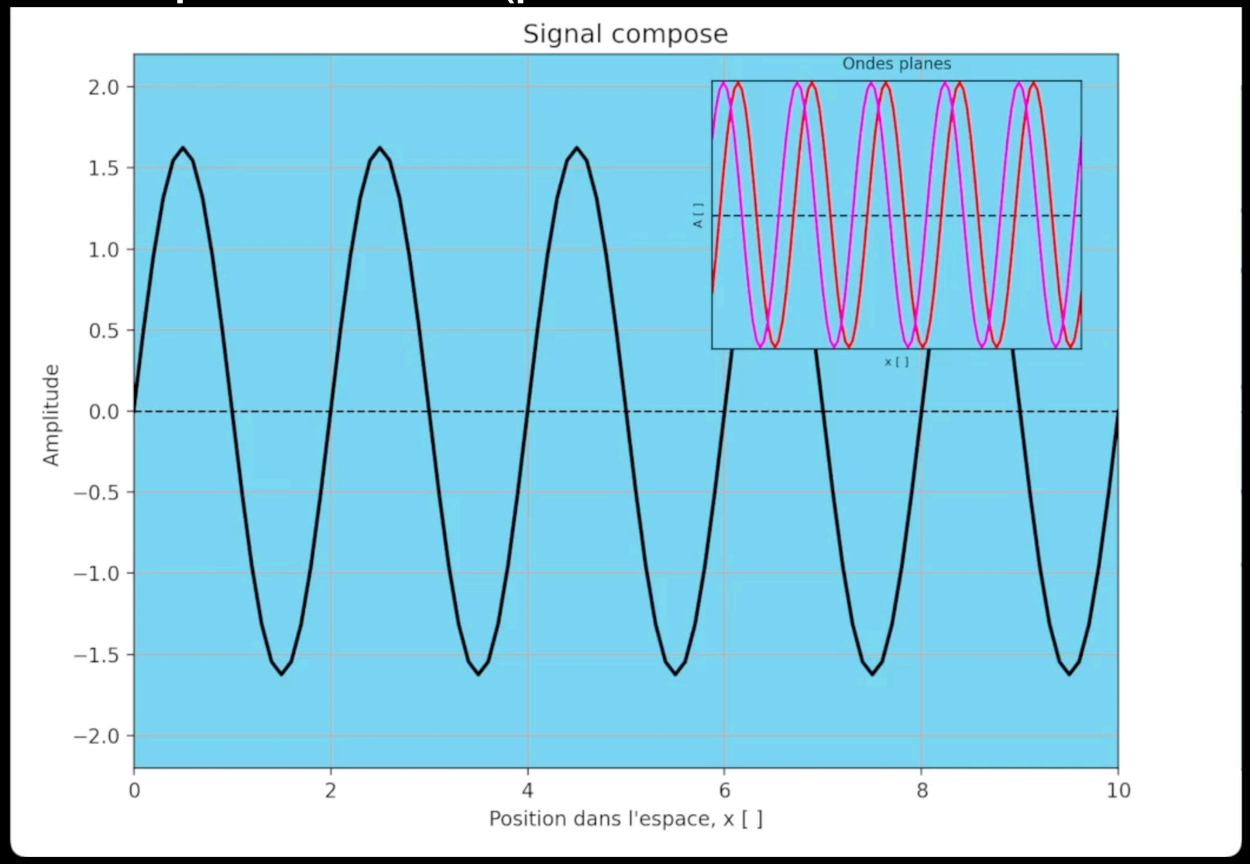
Onde comme perturbation

3. Modes propres, ondes stationnaires

- Mouvement dans une cavité, contraintes sur le mouvement : réflexion
- Conditions aux bords typiques : amplitude = 0 (pincement d'une corde ..)



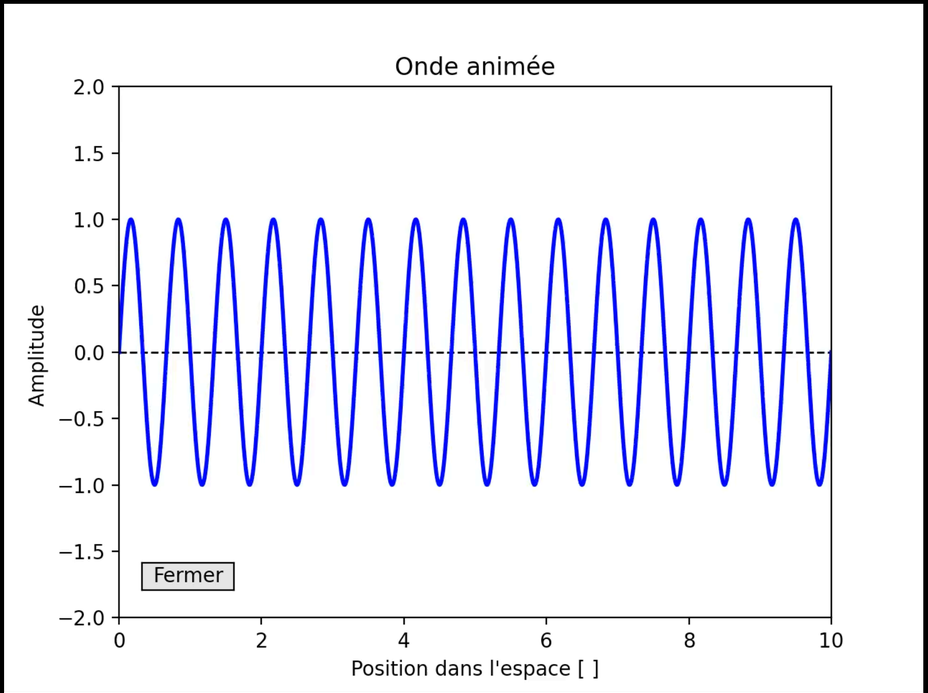
Un mode propre peut

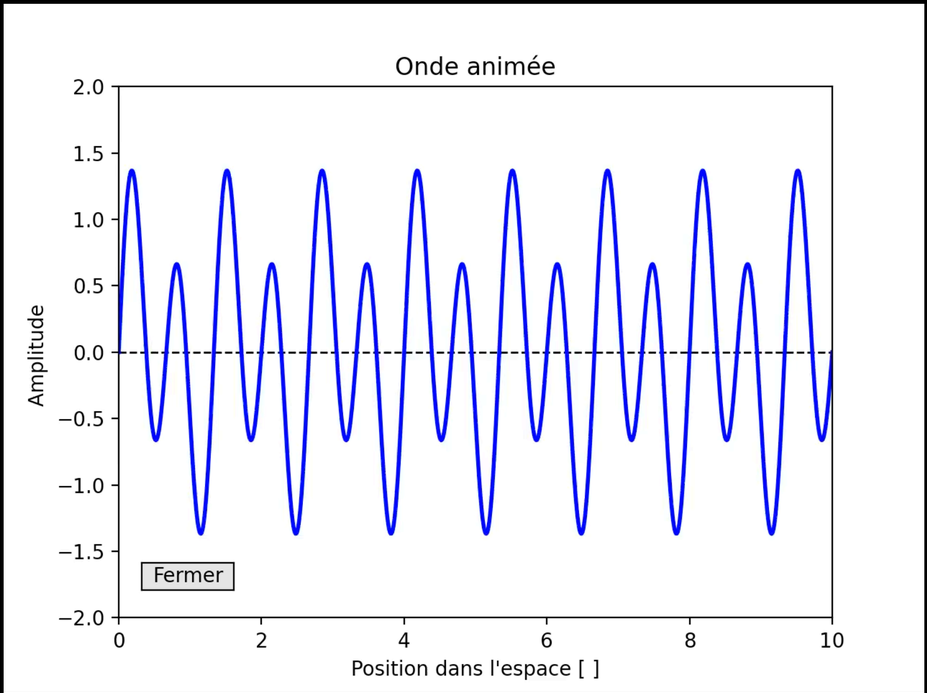


Le principe de superposition en pratique

Fréquences, phases arbitraires : illustrations

- Un mode simple (fondamental), à gauche ; deux modes de fréquences différentes, à droite



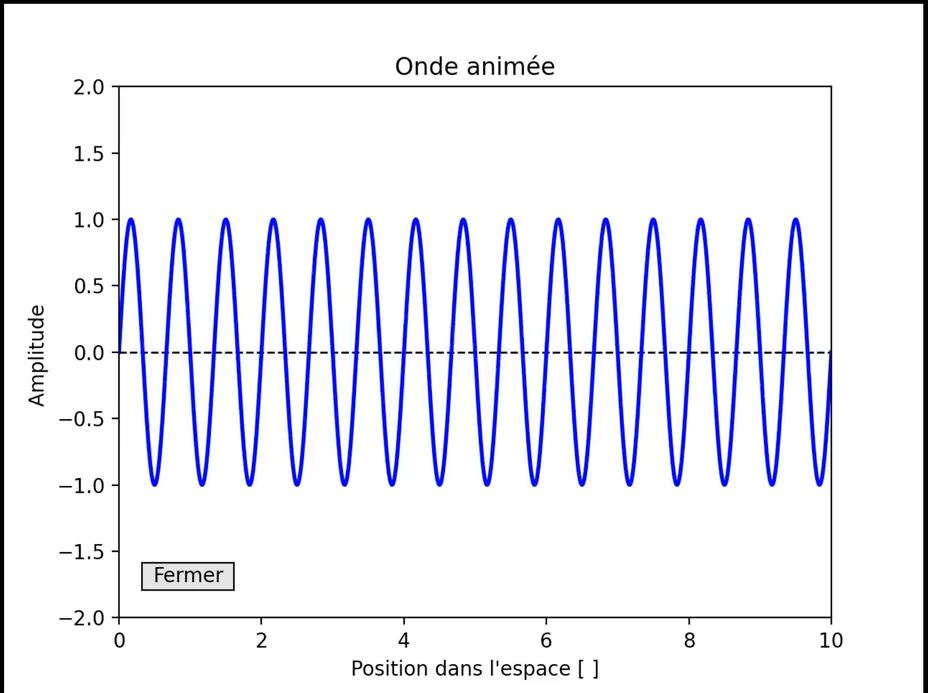


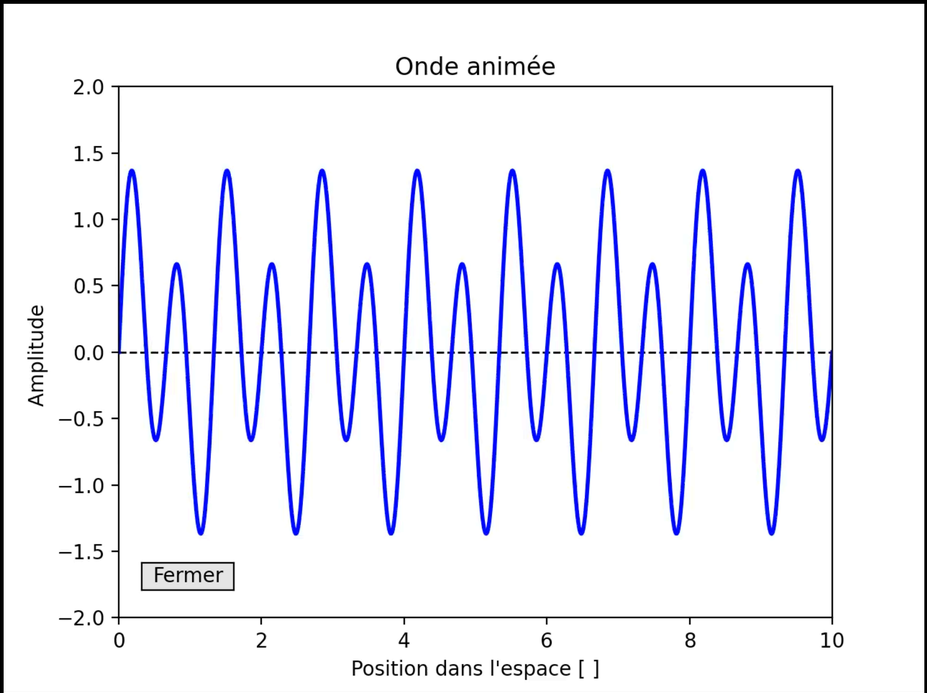
Pause

Le principe de superposition en pratique

Fréquences, phases arbitraires : illustrations

- Un mode simple (fondamental), à gauche ; deux modes de fréquences différentes, à droite



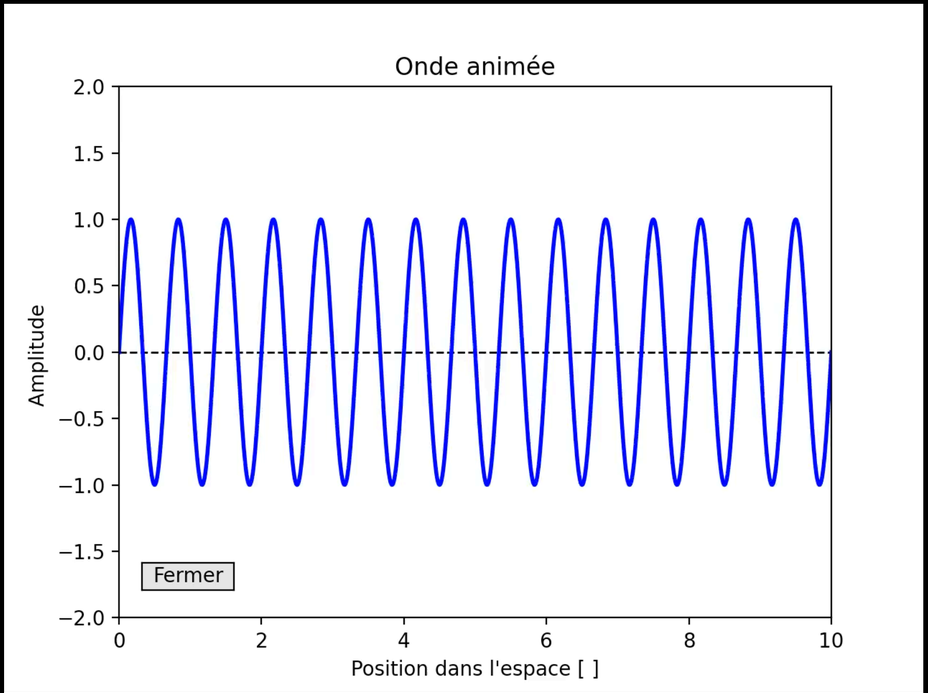


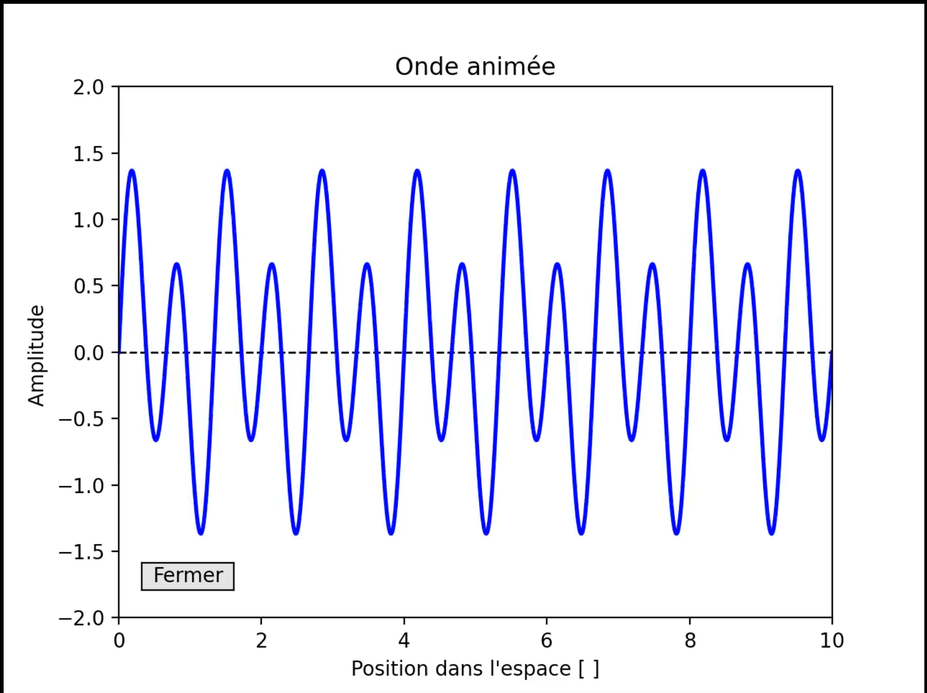
Pause

Le principe de superposition en pratique

Fréquences, phases arbitraires : illustrations

- Un mode simple (fondamental), à gauche ; deux modes de fréquences différentes, à droite





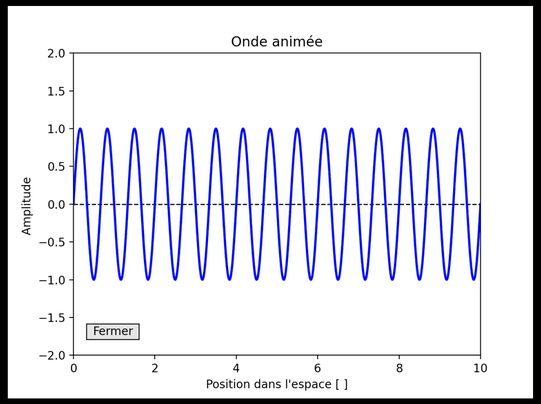
Pause

Le principe de superposition en pratique

Fréquences, phases arbitraires : illustrations

- Avec un spectre de modes : la propagation de l'onde devient complexe
- La relation de dispersion associe la fréquence (= réponse du milieu) à la longueur d'onde λ de la perturbation : $w \longrightarrow w(k)$ avec $k = 2\pi / \lambda$ le *nombre d'onde*
- La *vitesse de phase* est donné par le rapport : $v_p = w / k$
- La *vitesse de groupe*, elle, se calcule par le rapport des variation : $v_g = \Delta w / \Delta k$
- Les deux vitesses sont égales si $w(k) \propto k$ (et donc $w[0] = 0$)
- Dans ce cas : le milieu est non-dispersif
- Sinon : les ondes se disperses au fil du temps

  (les phases se mélangent, ..)

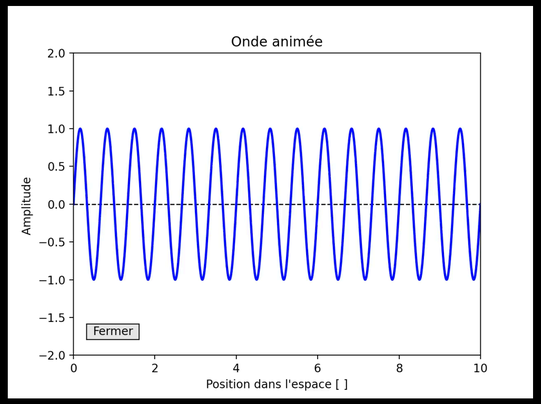


Le principe de superposition en pratique

Fréquences, phases arbitraires : illustrations

- Avec un spectre de modes : la propagation de l'onde devient complexe
- La relation de dispersion associe la fréquence (= réponse du milieu) à la longueur d'onde λ de la perturbation : $w \longrightarrow w(k)$ avec $k = 2\pi / \lambda$ le *nombre d'onde*
- La *vitesse de phase* est donné par le rapport : $v_p = w / k$
- La *vitesse de groupe*, elle, se calcule par le rapport des variation : $v_g = \Delta w / \Delta k$
- Les deux vitesses sont égales si $w(k) \propto k$ (et donc $w[0] = 0$)
- Dans ce cas : le milieu est non-dispersif
- Sinon : les ondes se disperses au fil du temps

  (les phases se mélangent, ..)

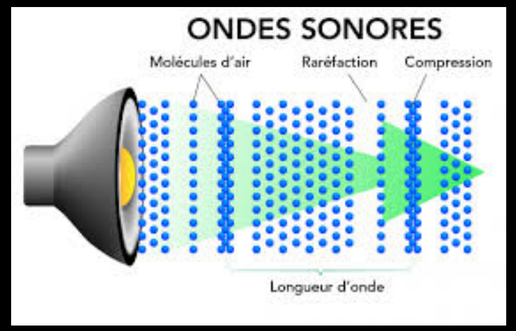


Propagation des ondes dans un milieu

ondes longitudinales, transversales

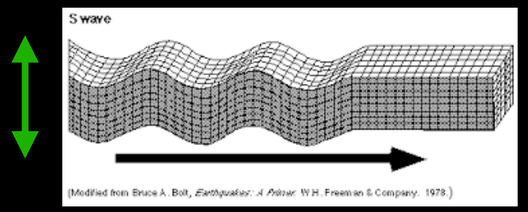
- Lavoisier : “la nature abhorre le vide”
- Pour qu’une onde se propage dans un milieu : force de rappel, réponse de ce milieu à la perturbation par rapport au point d’équilibre ;
- Pour un gaz : variations en densité —> variations de pression (équation d’état)
- Pour un solide : tension appliquée, déformation —> réponse élastique
- Le milieu est porteur d’information : c’est le spectre de Fourier qui l’encode (ou équivalent)

Gazeux

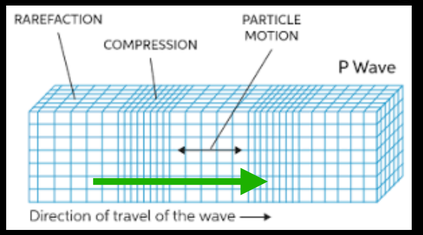


Solide

mode s (trans)



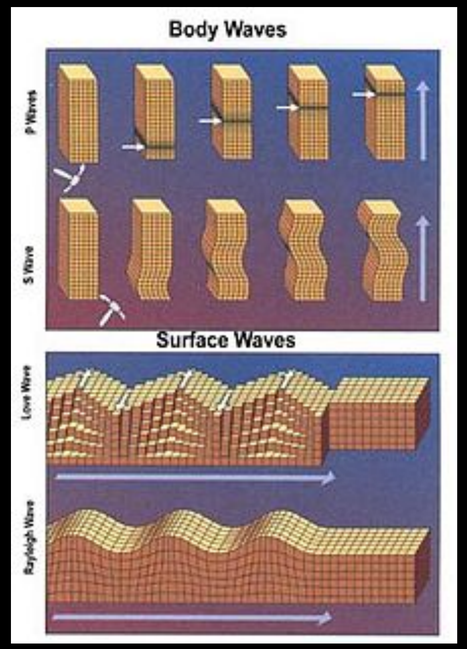
mode L (long)



Onde sismique : les tremblements de Terre

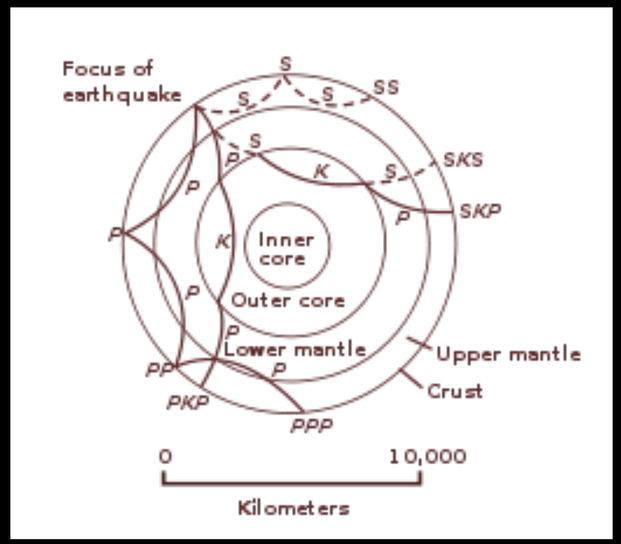
séisme des planètes, des étoiles

- La morphologie sphérique des planètes et étoiles contraind la propagation des ondes
- La stratification de l’enveloppe / atmosphère cause la réfraction des ondes (milieu inhomogène)
- le “taux de réfraction” est normalement fonction de la longueur d’onde du mode étudié



Types d’onde profonds (body) ou de surface

Coupe du globe terrestre avec identification des modes

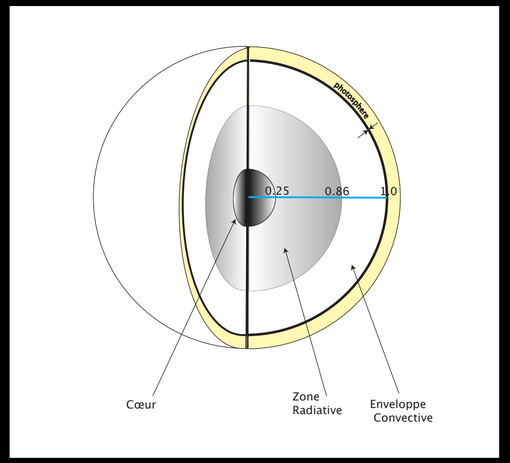


Astérosismologie
séisme des étoiles

- Les étoiles sont elles aussi stratifiées comme des oignons
- Le coeur chaud et dense : réactions nucléaires (haute densité)
- L’enveloppe radiative (quasi-statique) + convective (turbulence)
- L’information provient de la *photosphère ;* la couleur de la lumière indique le mouvement relatif du gaz (effet Doppler) :

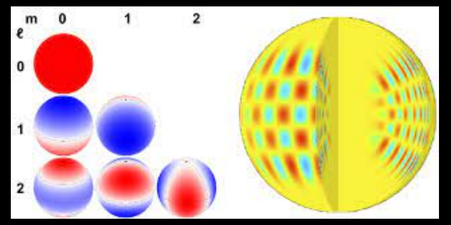
$$\Delta\lambda / \lambda = \pm | v | / c$$

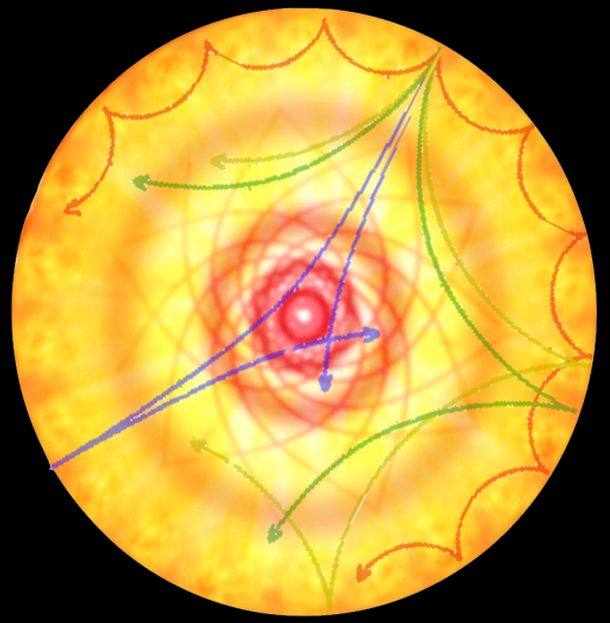
Coupe du Soleil : le noyau
est indiqué en noir ; la photosphère
en jaune

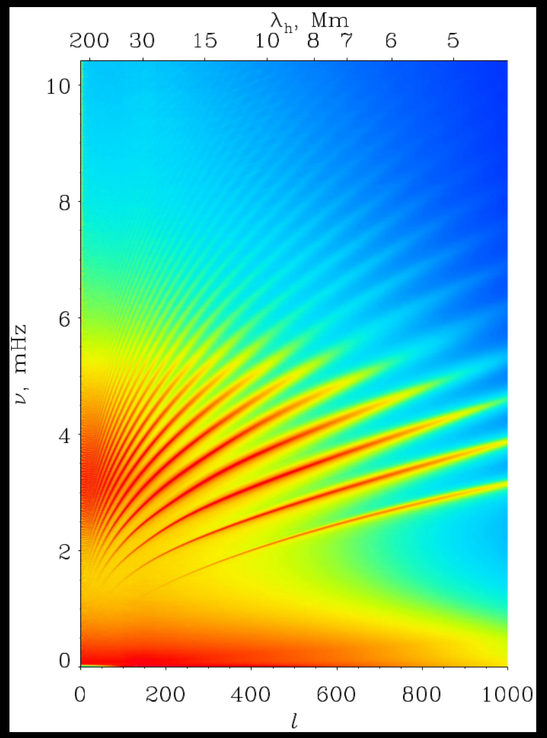


Astérosismologie
séisme des étoiles

- Mission telle que CoRot, TESS
- Le Soleil : SOHO, BiSon

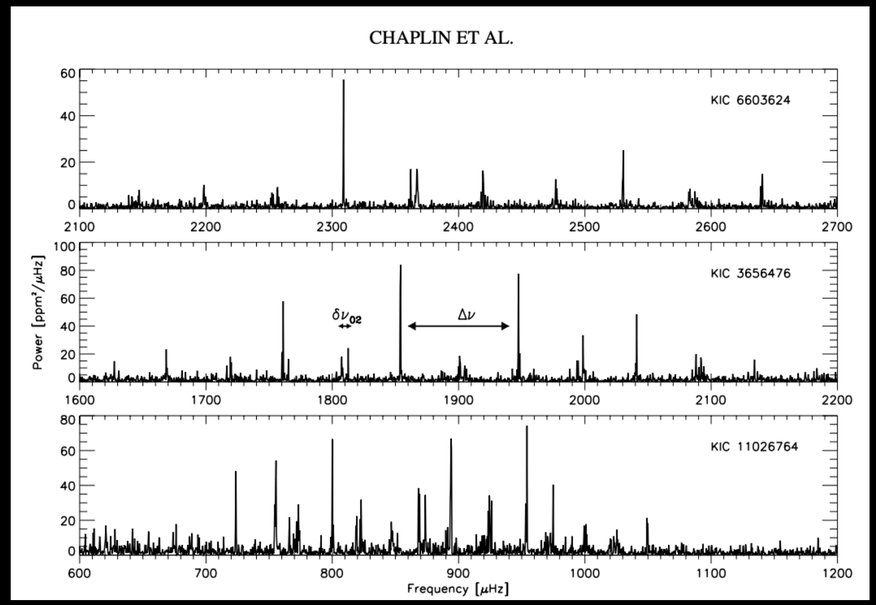






Relation w - k pour différents modes de vibration du Soleil (SOHO)

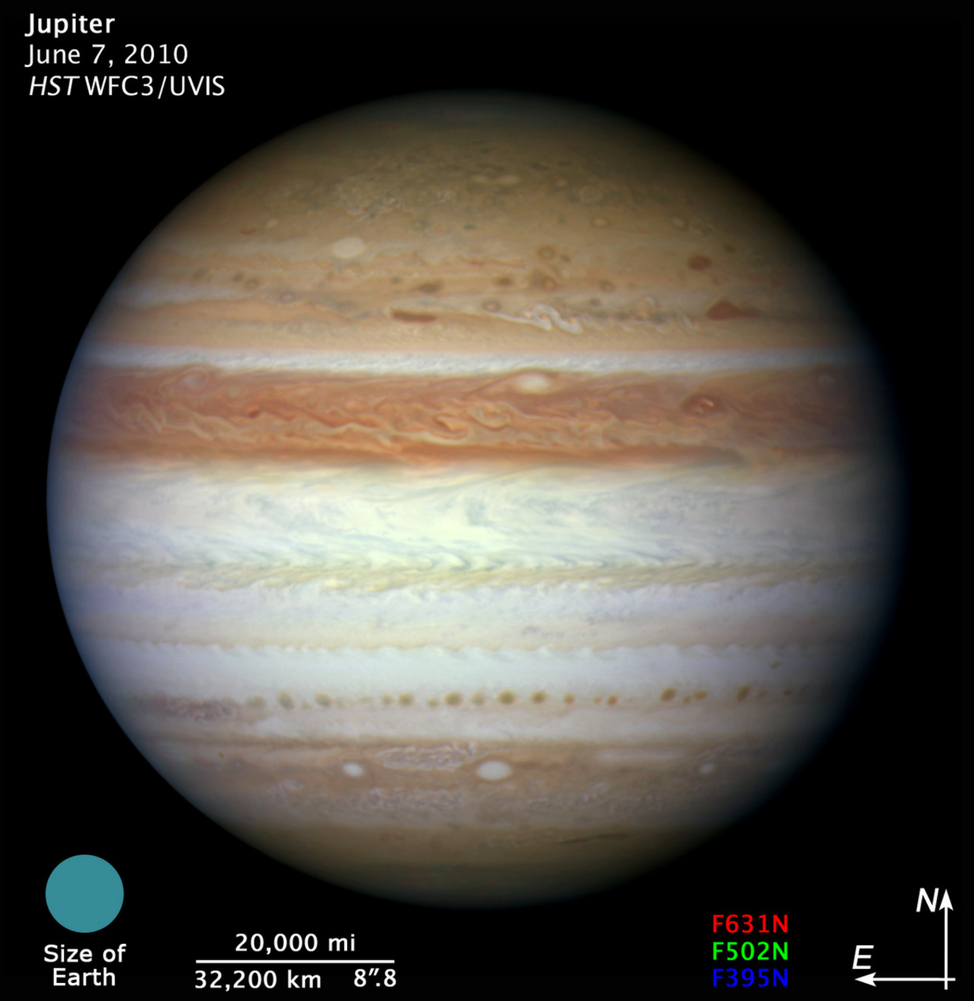
Spectre de puissance de Fourier pour des étoiles solaires (Kepler ; Chaplin et al 2010)



Astérosismologie

Rotation différentielle

- La roration différentielle complique la propagation d'onde
- Les modes de déplacement verticaux sont affecté par la gravitation (—> mode de *Kelvin*)
- Déplacement vertical : expansion, mélange à diverses latitude (Lavoisier ..)
- Ceci donne lieu à des instabilités entre les diverses strates (voir image HST de Jupiter)
- Instabilité de Kelvin-Helmoltz : vortex, strucutres en forme de plumes ..



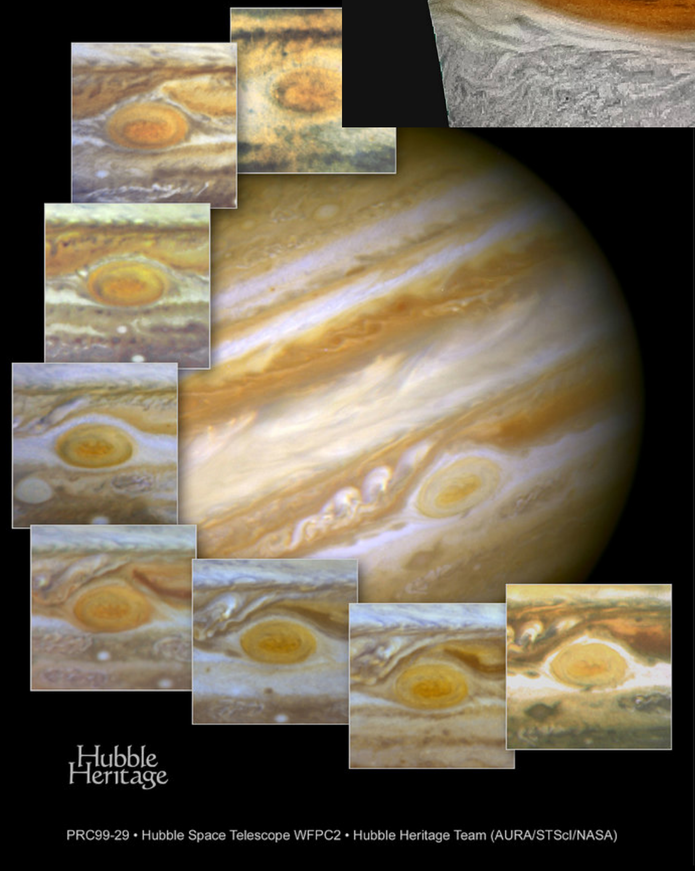
Astérosismologie

Exemple avec l’atmosphère de Jupiter

- Grande tache rouge : un cyclone avec v ~ 300 km/h
- Age estimé à 350 ans
- Instabilité de Kelvin-Helmoltz
- Développement sur la bonne dimension physique
- Echelle de temps beaucoup trop courte : il faut *entretenir* ce mécanisme



Mission Juno (2017)

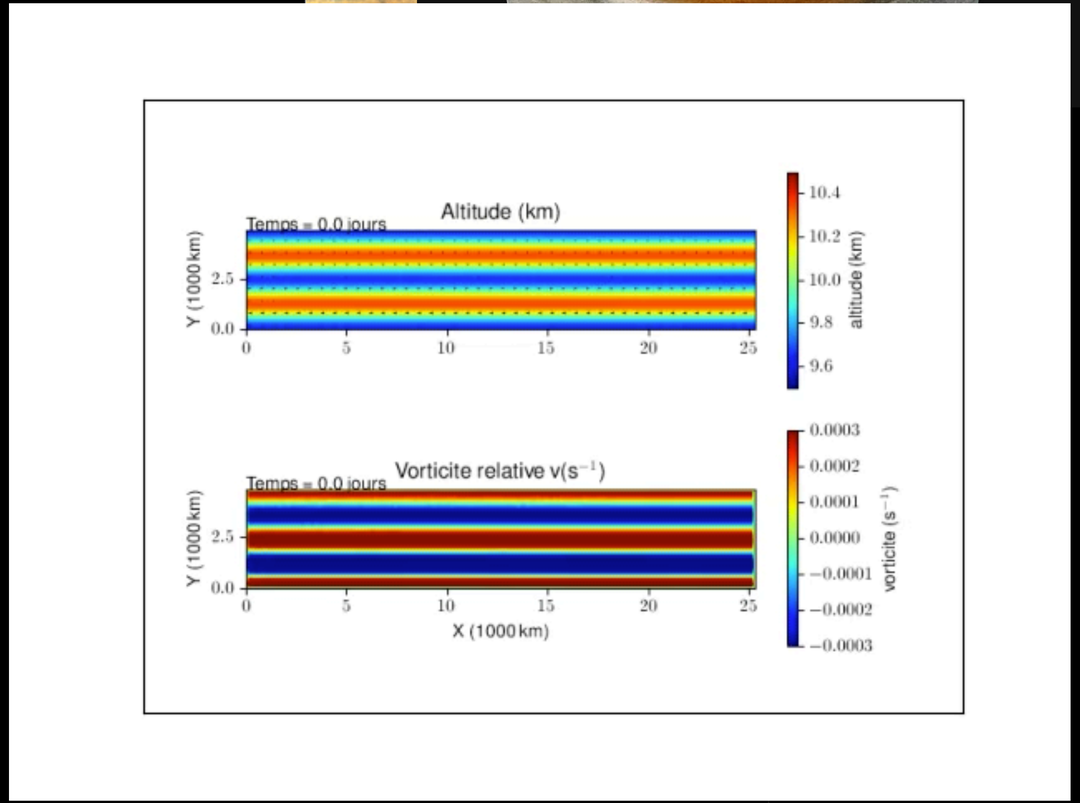


Astérosismologie

Exemple avec l’atmosphère de Jupiter



- Grande tache rouge : un cyclone avec v ~ 300 km/h
- Age estimé à 350 ans
- Instabilité de Kelvin-Helmoltz
- Développement sur la bonne dimension physique
- Echelle de temps beaucoup trop courte : il faut *entretenir* ce mécanisme



PRC99-29 • Hubble Space Telescope WFPC2 • Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)

Interférences

Expérience de T. Young

- Une perturbation (= source) ponctuelle : front d'onde symétrique



- Double perturbation (= 2 sources) : front d'onde intègre des franges



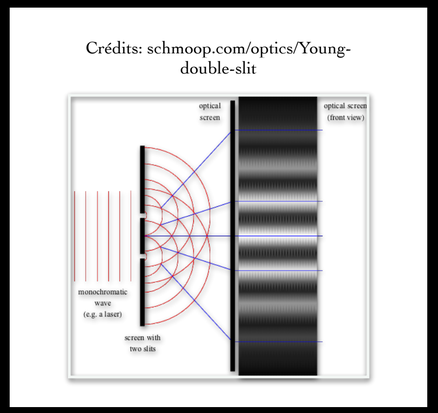


Question : comment contrôler la phase des deux signaux ? Idée de Young : faire passer l'onde (de lumière) par deux fentes (trous) et mesurer l'intensité sur un plan étendu.

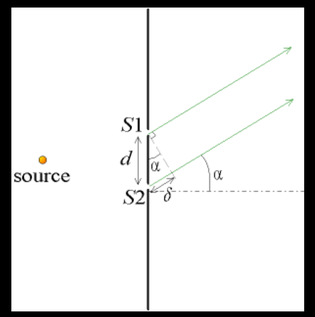
Interférences

Expérience de T. Young (1801)

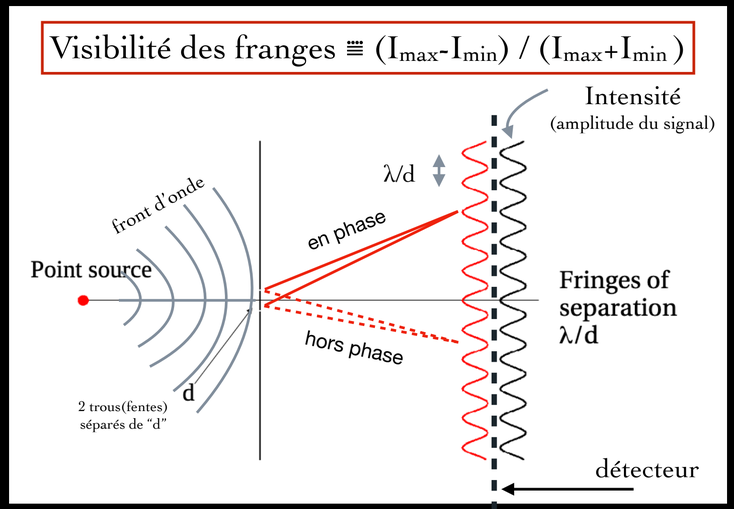
- Une seule source distante : limite d'un front d'onde plat, phase identique aux deux ouvertures (comme deux sources ponctuelles identiques)



Calcul de la différence du parcours optique ; la source est lointaine.
Crédits : Wiki



- La différence de *parcours optique* change la phase (superposition) au détecteur
- Constructive (+) destructive (-) selon la position au détecteur

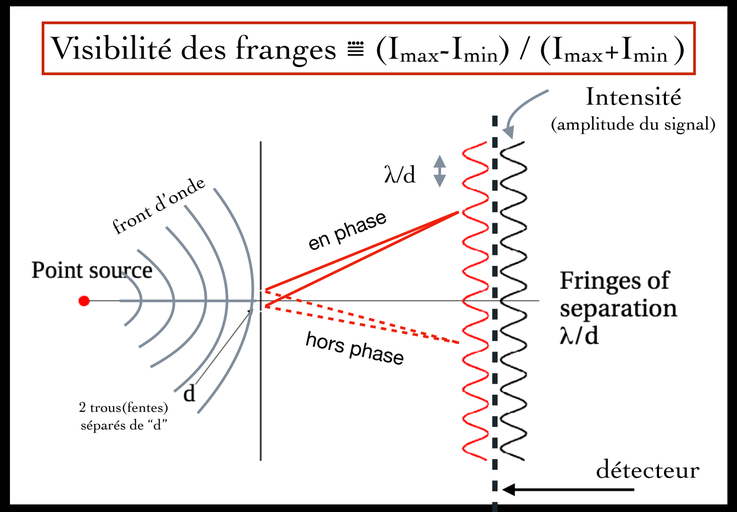


Interférences appliquées à l'astronomie

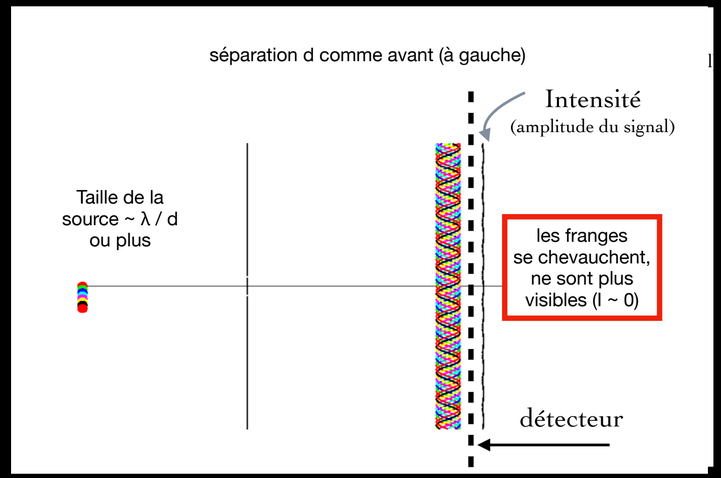
Expérience de T. Young

- Les franges : visibilité nulle pour une source étendue (d = constant)
- Réduire d : cela permet de faire apparaitre les franges à nouveau (visibilité grande si d << 1)
- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)

Source unique, distante des fentes ; séparation = *d*



Même dispositif, mais pour une source étendue

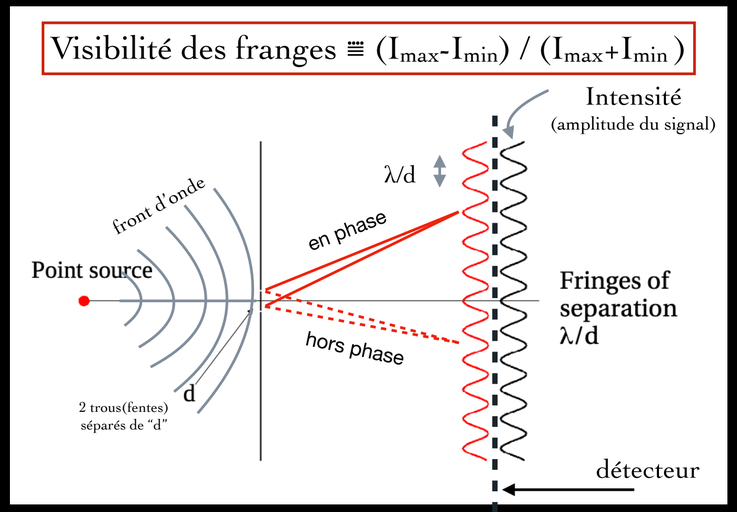


Interférences appliquées à l'astronomie

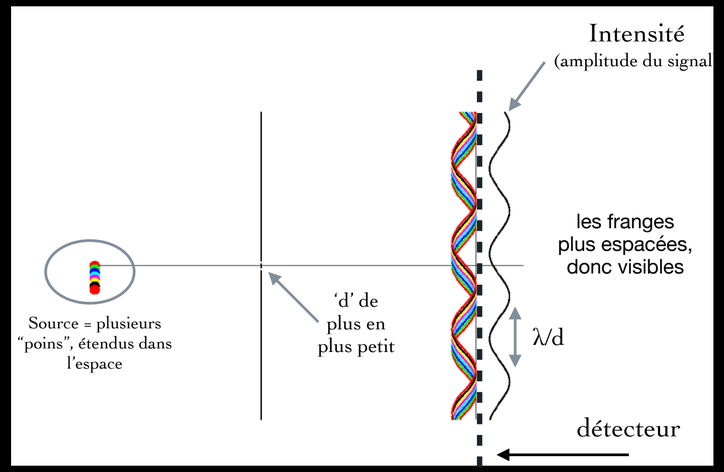
Expérience de T. Young

- Les franges : visibilité nulle pour une source étendue (d = constant)
- Réduire d : cela permet de faire apparaitre les franges à nouveau (visibilité grande si d << 1)
- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)

Source unique, distante des fentes ; séparation = *d*



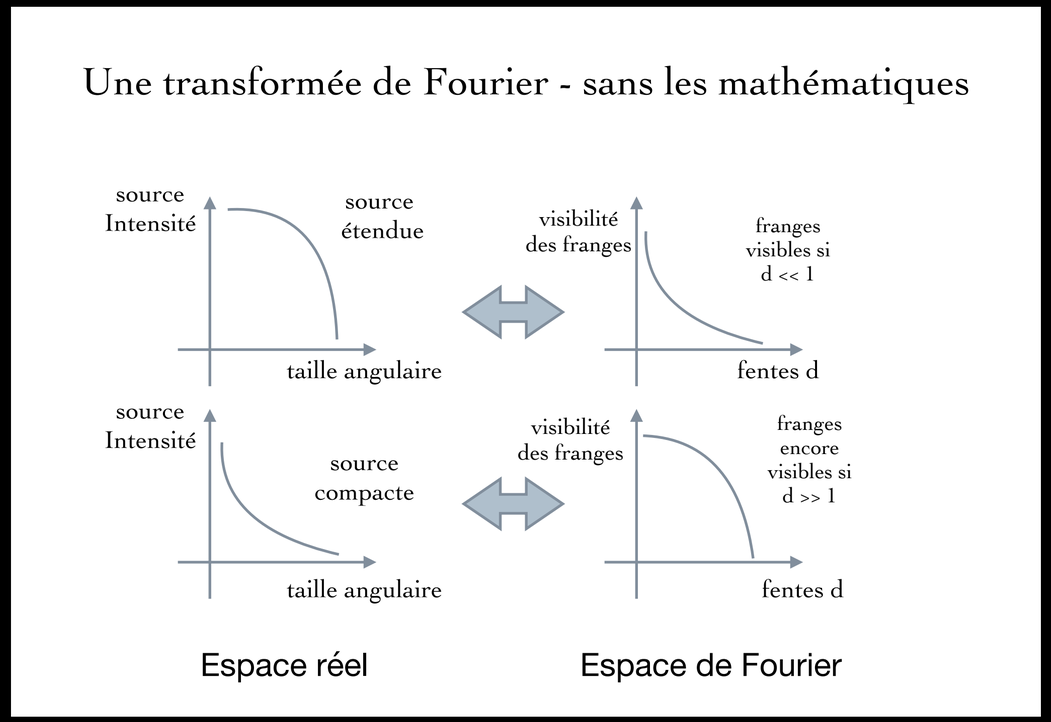
Même dispositif, mais pour une source étendue

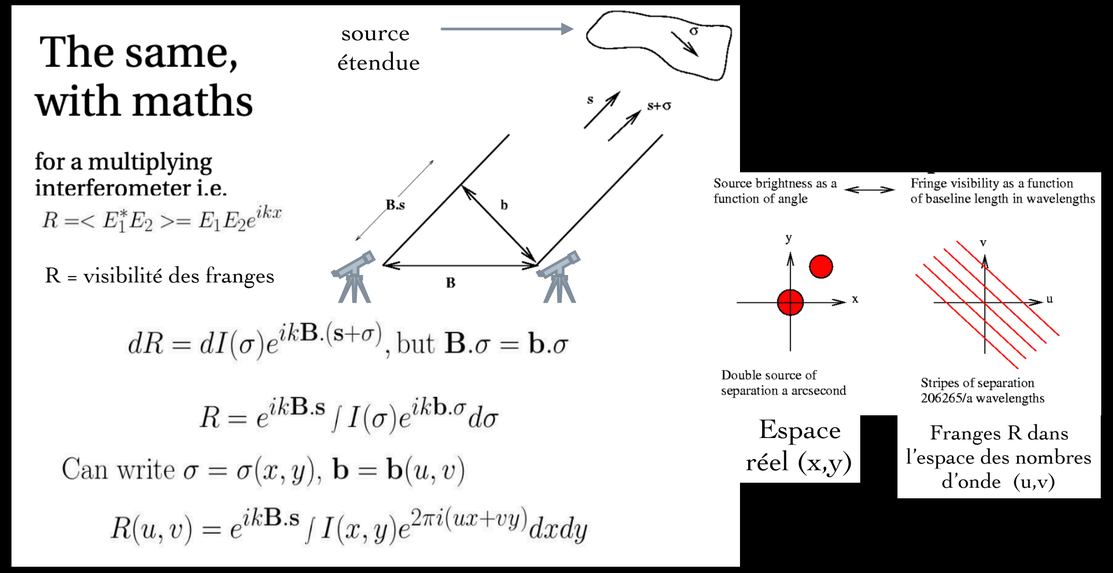


Interférences appliquées à l'astronomie

Expérience de T. Young & interférométrie

- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)
- Petites structures dans l'espace (x) requiert / permet une grande valeur de séparation *d* (ou nombre d'onde, *k*)
- Grandes structures (étendues) dans l'espace (x) requiert une toute petite valeur de *d* (ou nombre d'onde, *k*)

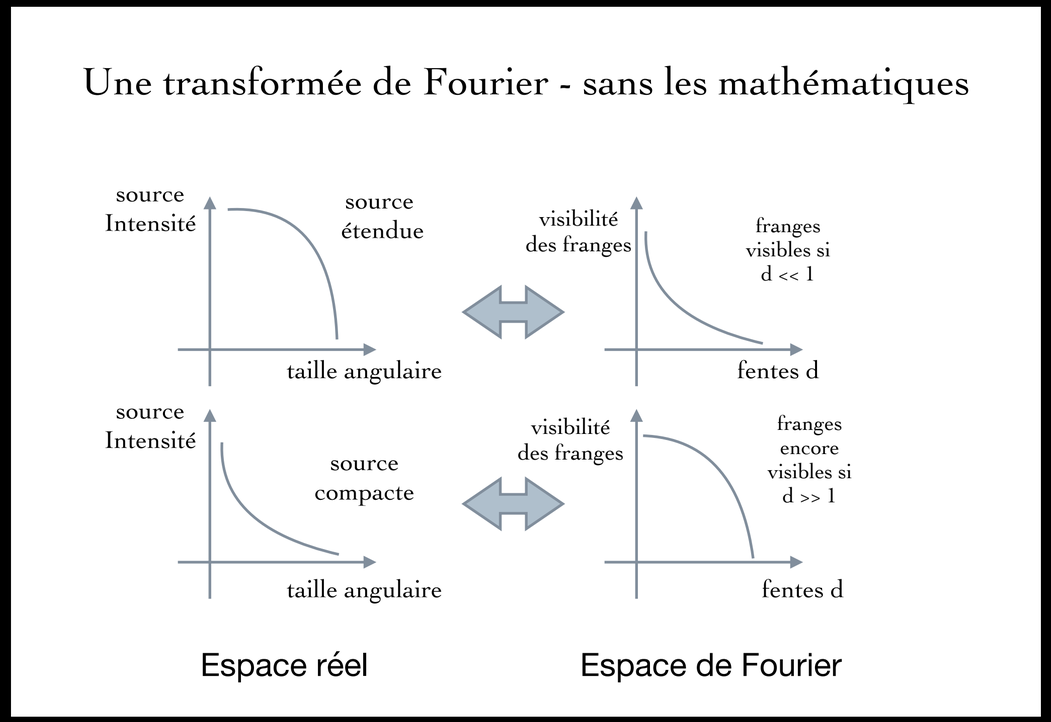


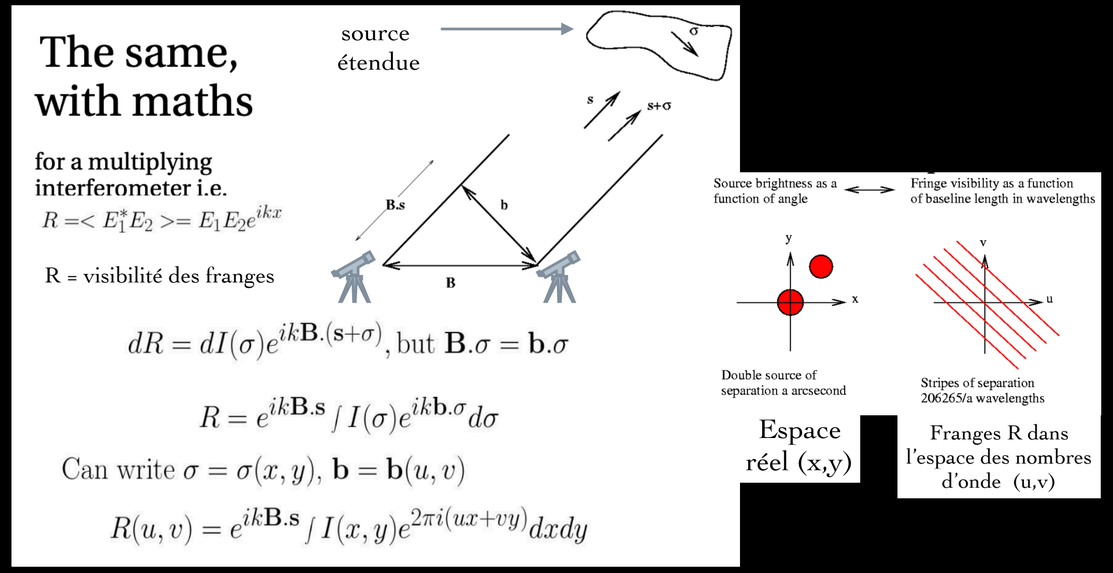


Interférences appliquées à l'astronomie

Expérience de T. Young & interférométrie

- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)
- Petites structures dans l'espace (x) requiert / permet une grande valeur de séparation *d* (ou nombre d'onde, *k*)
- Grandes structures (étendues) dans l'espace (x) requiert une toute petite valeur de *d* (ou nombre d'onde, *k*)



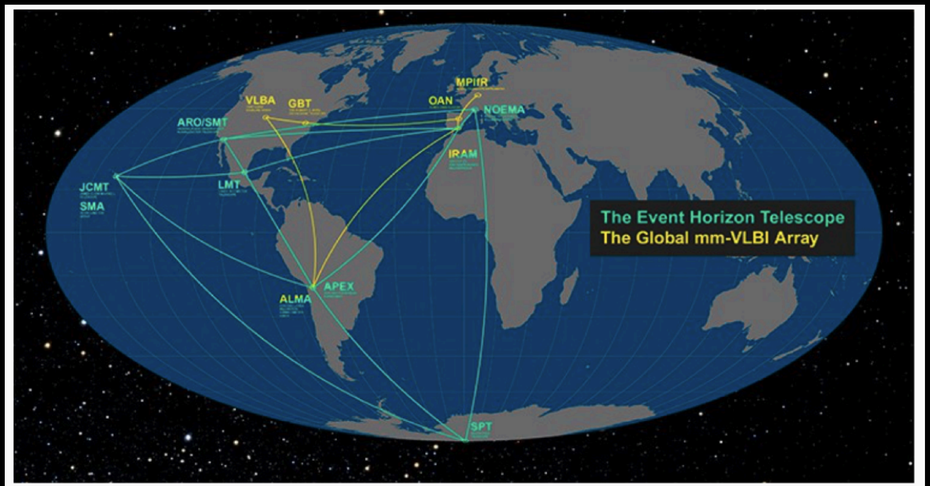


Interférences appliquées à l'astronomie

Le Event Horizon Telescope (EHT)

- Programme d'observation en cours : "ombrage" des trous noirs (@ehtelescope sur Twitter)
- Les trous noirs super-massifs ont $M > 10^6\ M_\odot$
- Résolution angulaire sans précédent : 22μ'', jusqu'à l'horizon d'un SMBH dans la galaxie M87 ; $M_{BH} \sim 6 \times 10^9\ M_\odot$ (distance ≈ 15 Mpc)
- voir https://eventhorizontelescope.org/science

SMB = Supermassive Black Hole
ou
Trou Noir Super-massif



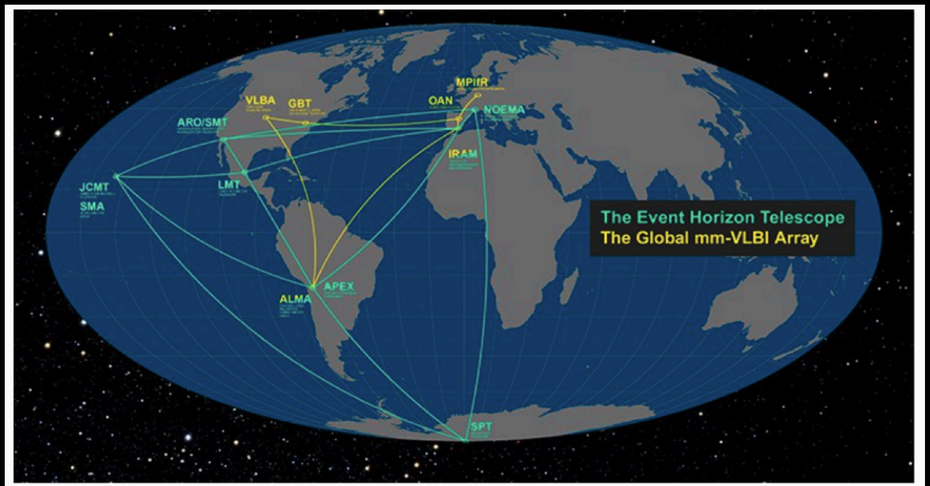
Two VLBI arrays that link radio dishes across the globe. The GMVA observes at a wavelength of 3mm, and the EHT observes at a wavelength of 1.3mm. The EHT reaches angular resolution (λ/d_p) of about 35 micro arcseconds, equivalent to standing in New York and being able to read the date on a quarter in Los Angeles. Credit: ESO/O. Furtak

Interférences appliquées à l'astronomie

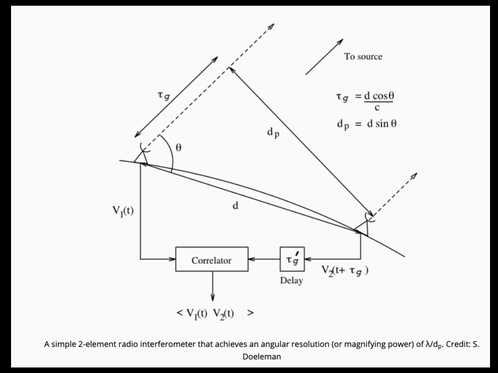
Le Event Horizon Telescope (EHT)

- Programme d'observation en cours : "ombrage" des trous noirs (@ehtelescope sur Twitter)
- Les trous noirs super-massifs ont $M > 10^6\ M_\odot$
- Résolution angulaire sans précédent : 22μ'', jusqu'à l'horizon d'un SMBH dans la galaxie M87 ; $M_{BH} \sim 6 \times 10^9\ M_\odot$ (distance ≈ 15 Mpc)
- voir https://eventhorizontelescope.org/science

SMB = Supermassive Black Hole
ou
Trou Noir Super-massif



Two VLBI arrays that link radio dishes across the globe. The GMVA observes at a wavelength of 3mm, and the EHT observes at a wavelength of 1.3mm. The EHT reaches angular resolution (λ/d_p) of about 35 micro arcseconds, equivalent to standing in New York and being able to read the date on a quarter in Los Angeles. Credit: ESO/O. Furtak



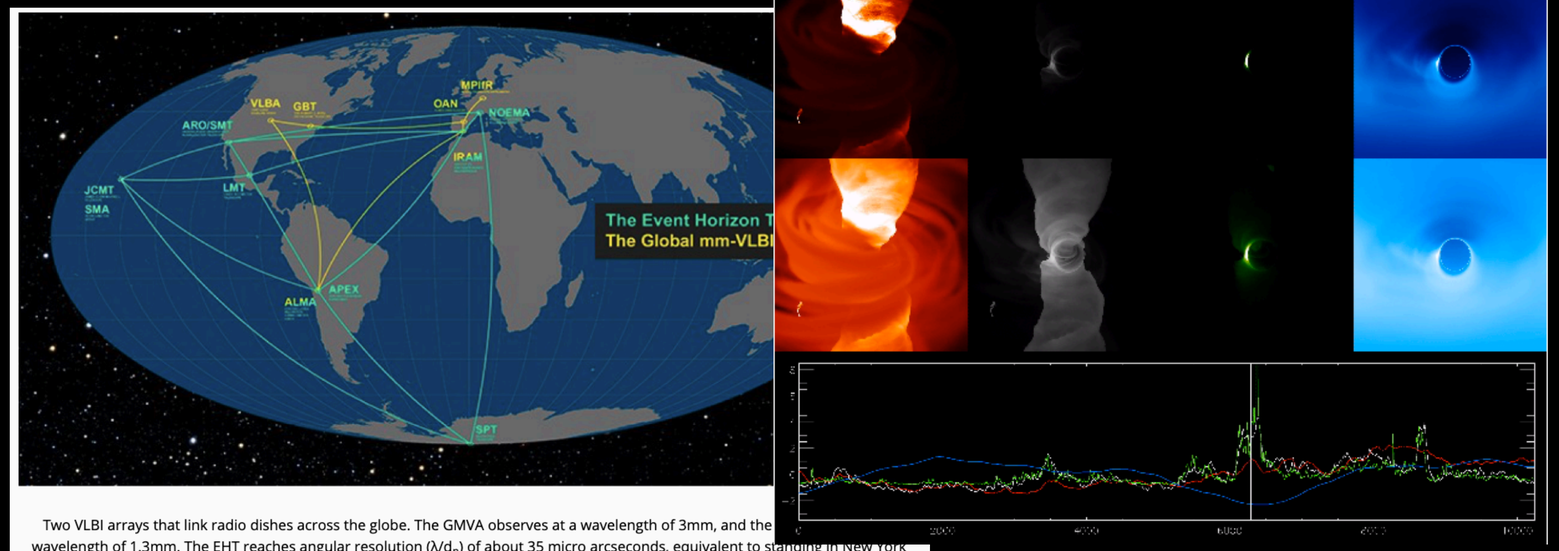
A simple 2-element radio interferometer that achieves an angular resolution (or magnifying power) of λ/d_p. Credit: S. Doeleman

Interférences appliquées à l'astronomie

Le Event Horizon Telescope (EHT)

- Programme d'observation en cours : "ombrage" des trous noirs (@ehtelescope sur Twitter)
- Les trous noirs super-massifs ont $M > 10^6\ M_\odot$
- Résolution angulaire sans précédent : 22μ'', jusqu'à l'horizon d'un SMBH dans la galaxie M87 ; $M_{BH} \sim 6 \times 10^9\ M_\odot$ (distance ≈ 15 Mpc)
- voir https://eventhorizontelescope.org/science

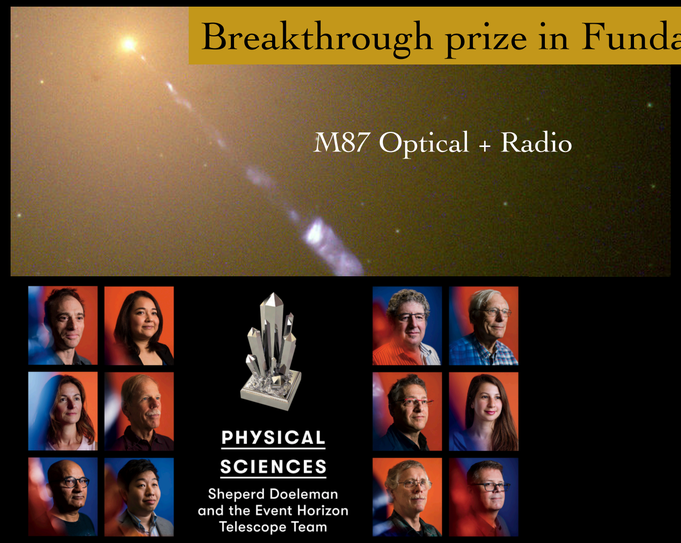
SMB = Supermassive Black Hole
ou
Trou Noir Super-massif

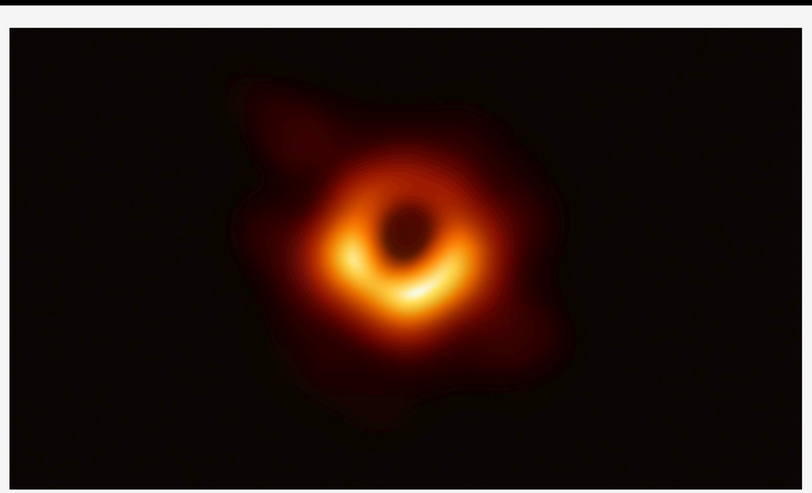


Two VLBI arrays that link radio dishes across the globe. The GMVA observes at a wavelength of 3mm, and the wavelength of 1.3mm. The EHT reaches angular resolution (λ/d_p) of about 35 micro arcseconds, equivalent to standing in New York and being able to read the date on a quarter in Los Angeles. Credit: ESO/O. Furtak

Interférences appliquées à l’astronomie

Le Event Horizon Telescope (EHT)





10 / 04
2019

Scientists have obtained the first image of a black hole, using Event Horizon Telescope observations of the center of the galaxy M87. The image shows a bright ring formed as light bends in the intense gravity around a black hole that is 6.5 billion times more massive than the Sun. This long-sought image provides the strongest evidence to date for the existence of supermassive black holes and opens a new window onto the study of black holes, their event horizons, and gravity. Credit: Event Horizon Telescope Collaboration

Ondes & Cosmos
Contenu, objectifs



Une locomotive à vapeur (mon rêve)

- Cours 2 : Les ondes et la thermodynamique
    - ✓ Revenir sur l’expérience de Young et l’interférométrie
        - Interférométrie et observations astronomiques
    - ✓ Définitions, revue de quelques concepts clés de la thermodynamique
        - ~~transfert de chaleur, principes de Carnot~~ ??
        - bain de chaleur, statistique de Boltzmann, entropie
    - ✓ Le rayonnement du corps noir, thermodynamique à l’équilibre
    - ✓ Etre invisible : une question d’équilibre ou d’imagination ?
    - ✓ 3 mai @ 18h15 (1h)