

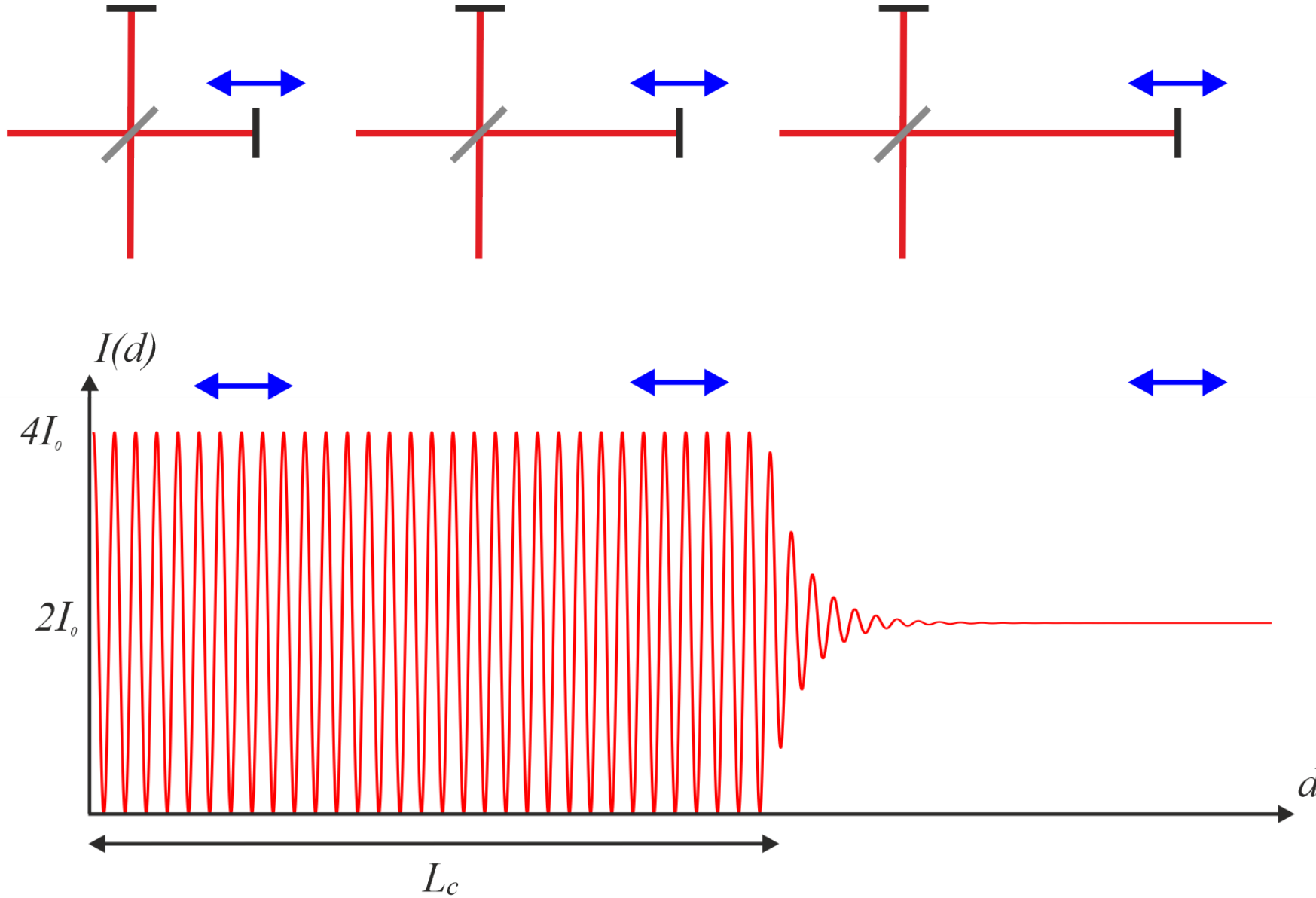
Ingénierie optique

Semaine 4 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Cohérence temporelle

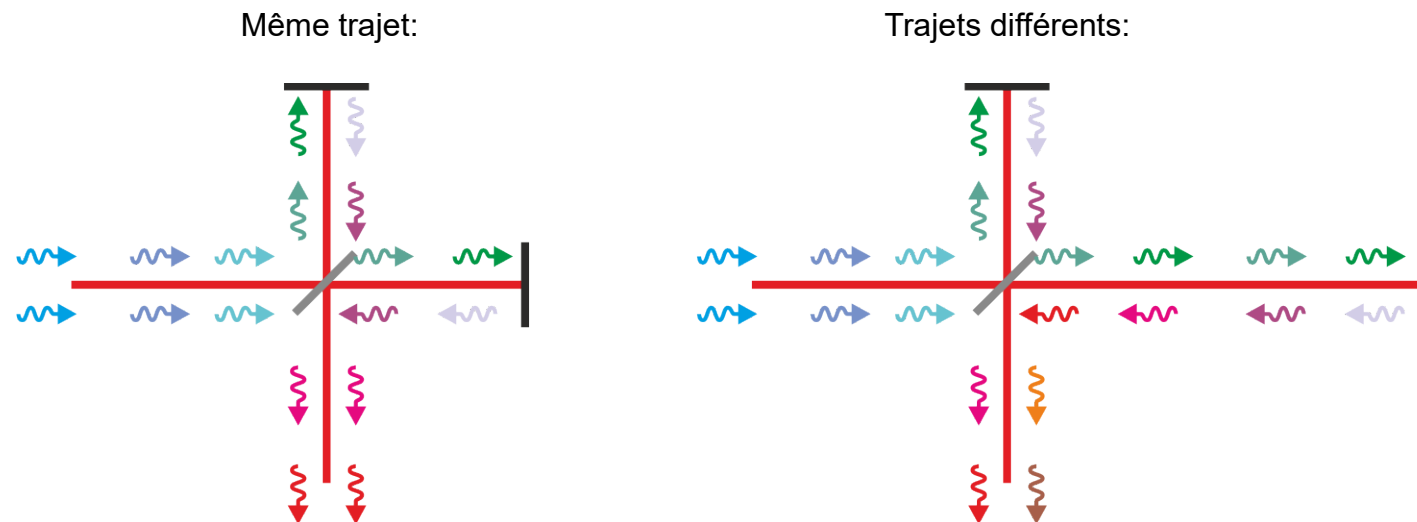


Cohérence temporelle

- L'interférence n'est possible que si ce sont des photons "similaires" qui interagissent (des photons qui sont cohérents)
- Malheureusement, les photons produits par une source varient dans le temps
- Peu à peu leur phase varie dans le temps

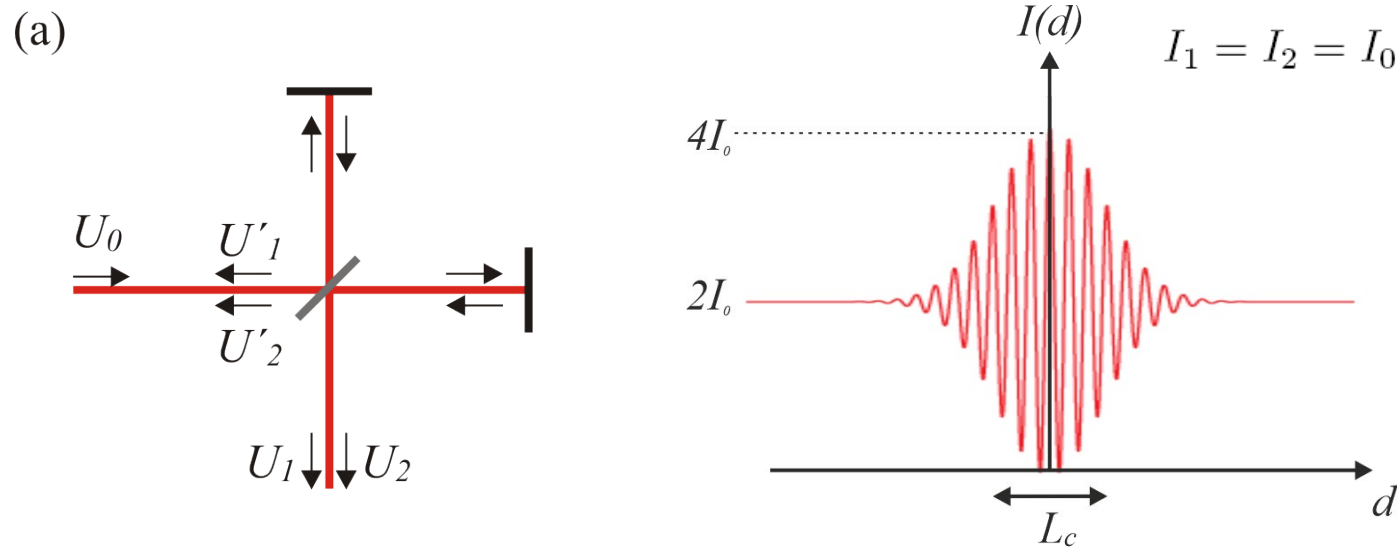


- Si les trajets sont très différents dans l'interféromètre, ce sont des photons différents qui interagissent et il n'est plus possible de faire une interférence



Cohérence temporelle

- Les franges ne sont bien visibles que pour une différence de chemin d limitée:



Typical values

Laser type	Typical coherence length
Lamp pumped Nd:YAG	1 cm
HeNe (non-stabilized)	20 cm
HeNe (stabilized)	1 km
Argon/Krypton	1 cm
Argon/Krypton and Etalon	1 m
Dye laser	5 .. 250 m
Fibre laser (non-stabilized)	50 μ m
Fibre laser (stabilized)	100 km
Free-running diode laser	<1 mm
External-cavity diode laser	100 .. 1000 m

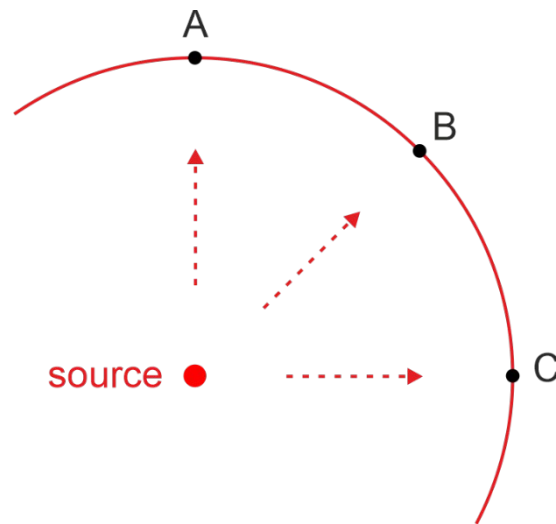
- Visibilité des franges: $\mathcal{V} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$

- Longueur de cohérence: L_c distance pour laquelle la visibilité est supérieure à la moitié du maximum, elle dépend de la source utilisée

- Temps de cohérence $\tau_c = \frac{L_c}{c}$

Cohérence spatiale

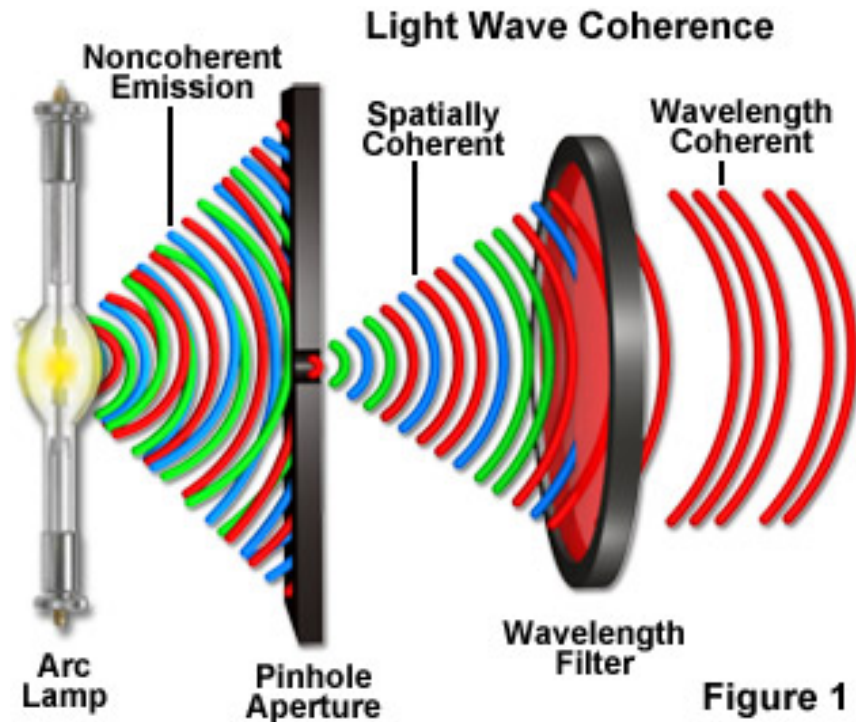
- La cohérence temporelle indique la fluctuation des photons dans le temps, elle dépend de la dynamique de la source
- La cohérence spatiale indique la fluctuation dans l'espace, elle dépend en général de l'étendue de la source



- Si la source est cohérente spatialement, la phase des photons sera la même aux points A, B et C

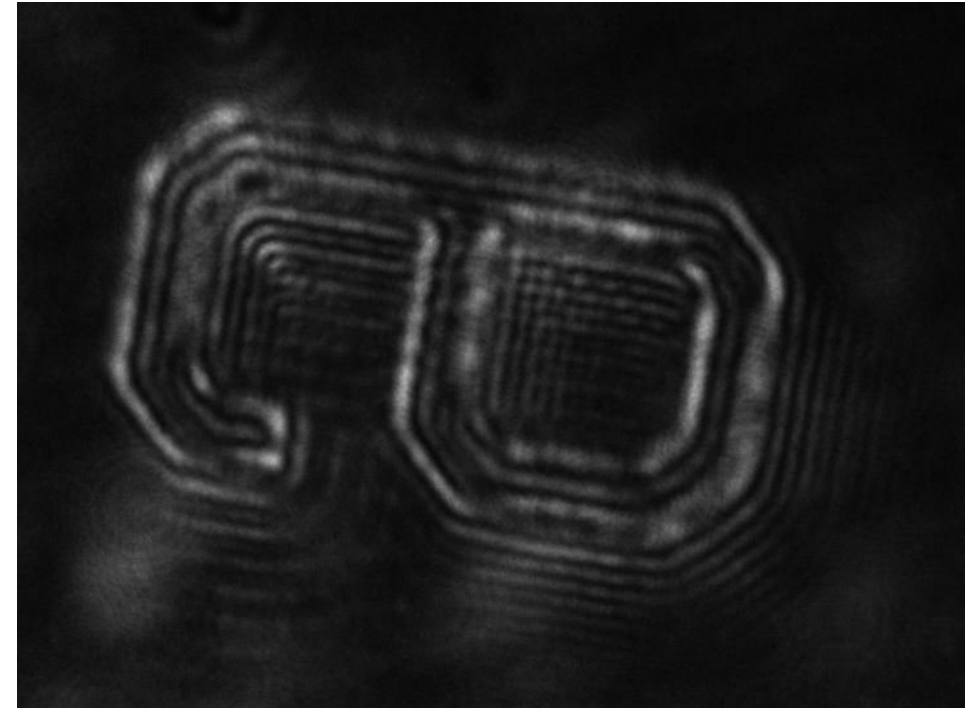
Cohérence temporelle et spatiale

- A-partir d'une source incohérente, il est possible de créer une source cohérente spatialement puis temporellement:



Zeiss-Campus

Image de microscope obtenue avec un illumination ayant une très forte cohérence

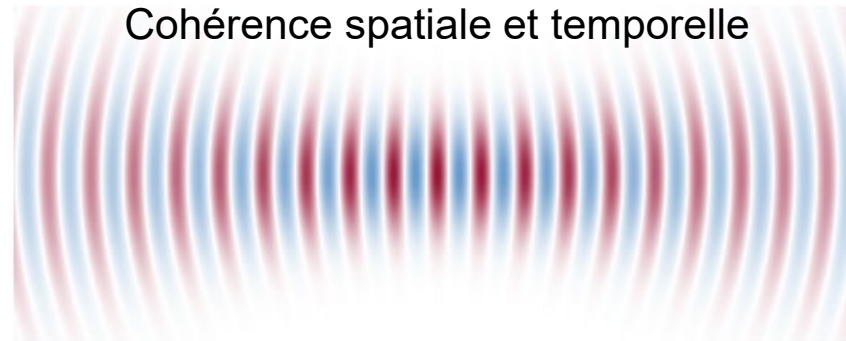
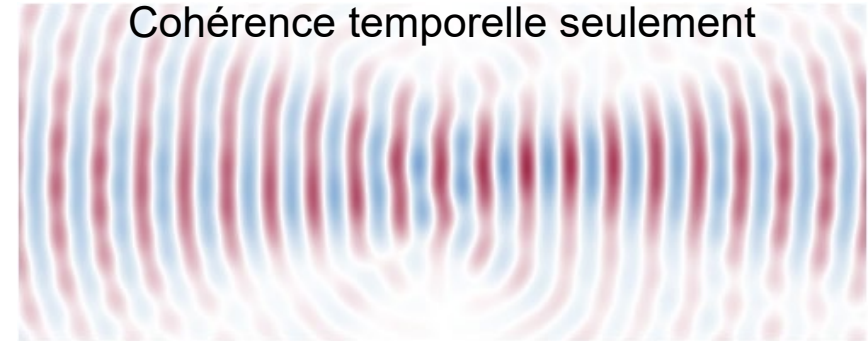
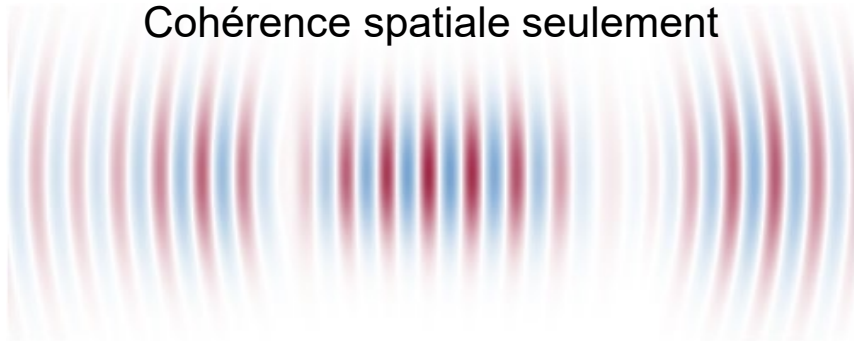


Yi Zhou, Chongqing University (ResearchGate.net)

- Attention: une illumination cohérente n'est pas toujours désirable, elle peut produire des interférences et des speckles ("des taches")

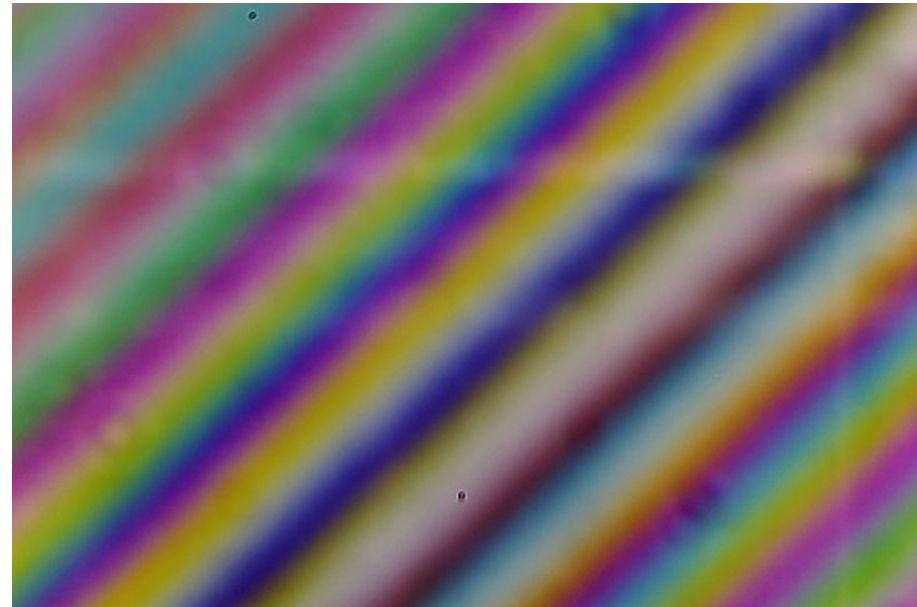
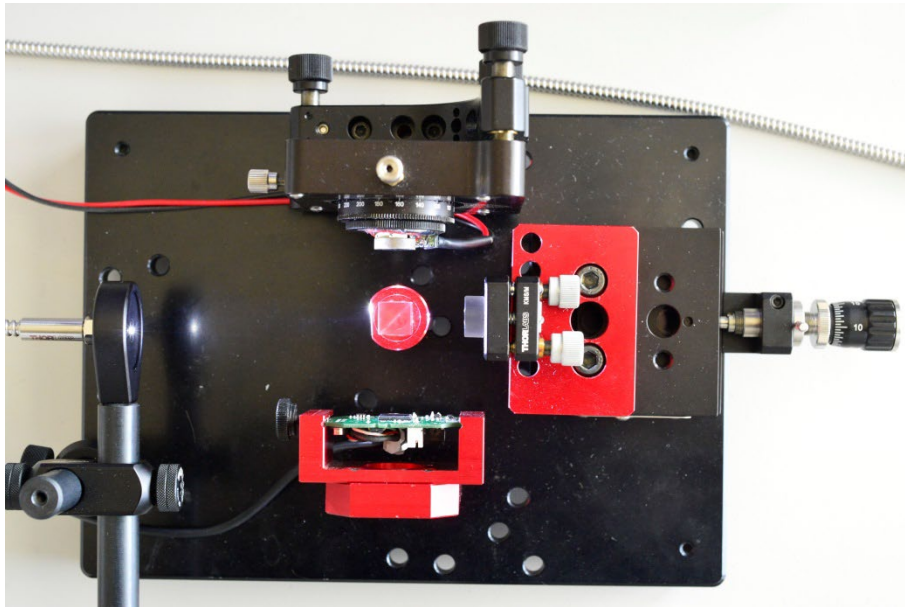
Cohérence temporelle et spatiale

- On peut illustrer les cohérences spatiales et temporelles sur un faisceau Gaussien monochromatique:



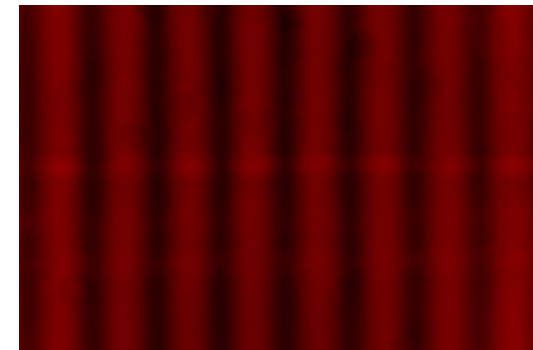
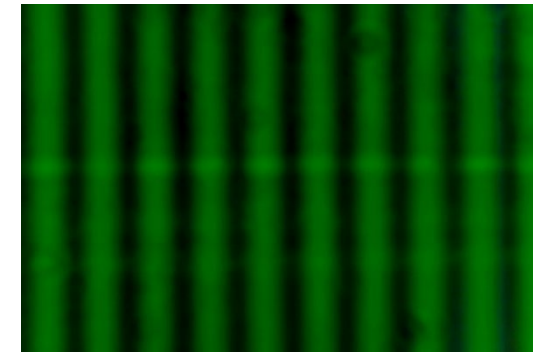
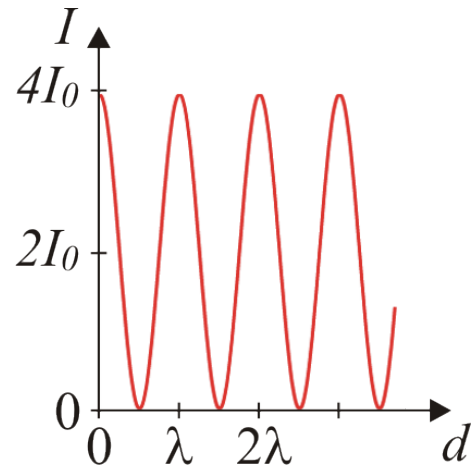
Interférence en lumière blanche (TP)

- Il est possible de faire une interférence avec de la lumière blanche, par exemple avec une source LED
- Les franges d'interférence contiennent toutes les couleurs ainsi que des franges blanches



Interférence en lumière blanche (TP)

- En sélectionnant une bande de longueurs d'onde, le nombre de franges change (peu de franges pour une grande longueur d'onde)



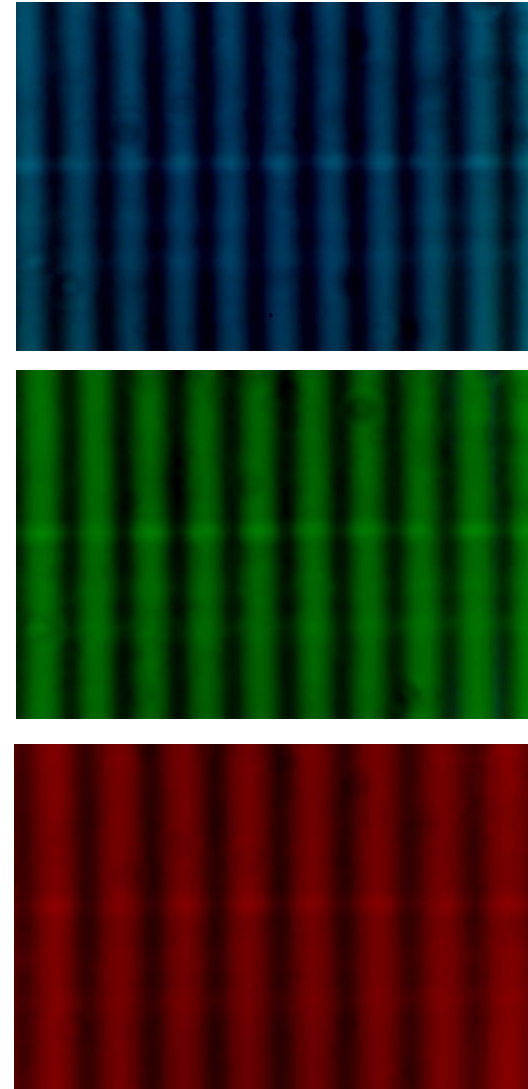
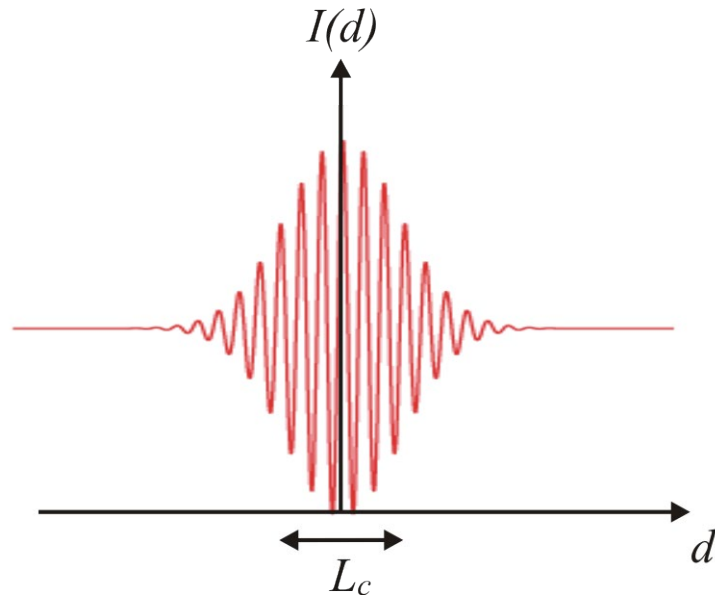
Filtres centrés autour de $\lambda=488$ nm (bleu),
 $\lambda=530$ nm (vert) ou $\lambda=632$ nm (rouge)
(largeur du filtre $\Delta\lambda=10$ nm)

Interférence en lumière blanche (TP)

- Pour de la lumière polychromatique (contenant un spectre de longueurs d'onde λ), la cohérence temporelle dépend de la largeur de ce spectre:

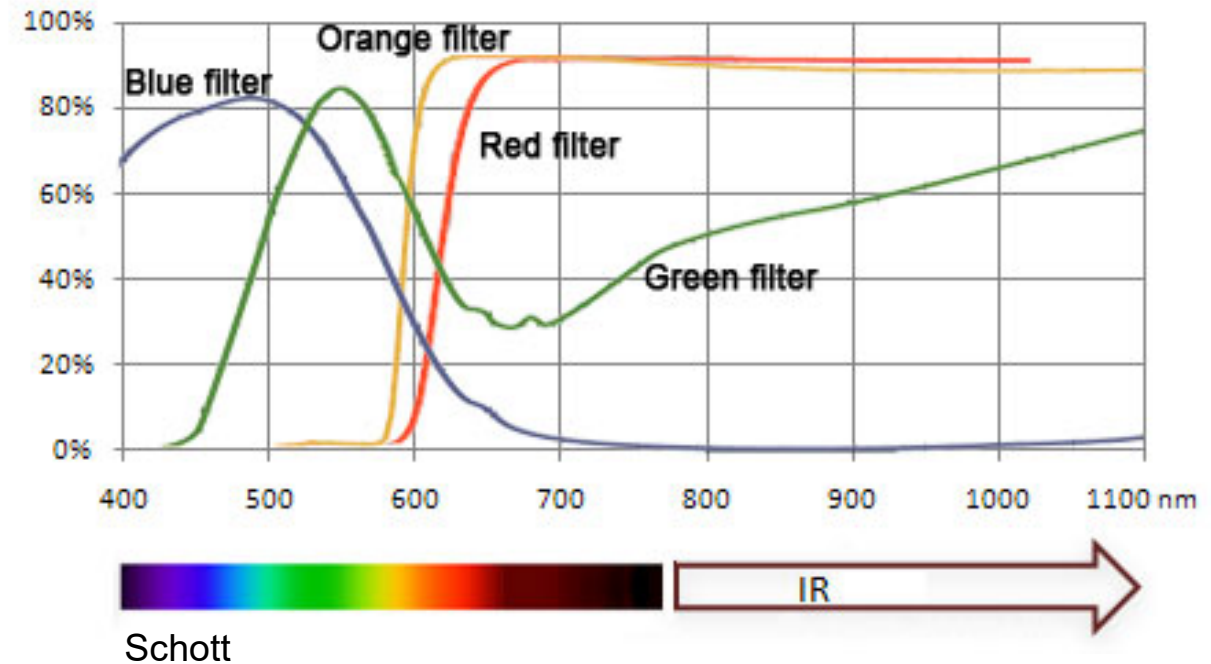
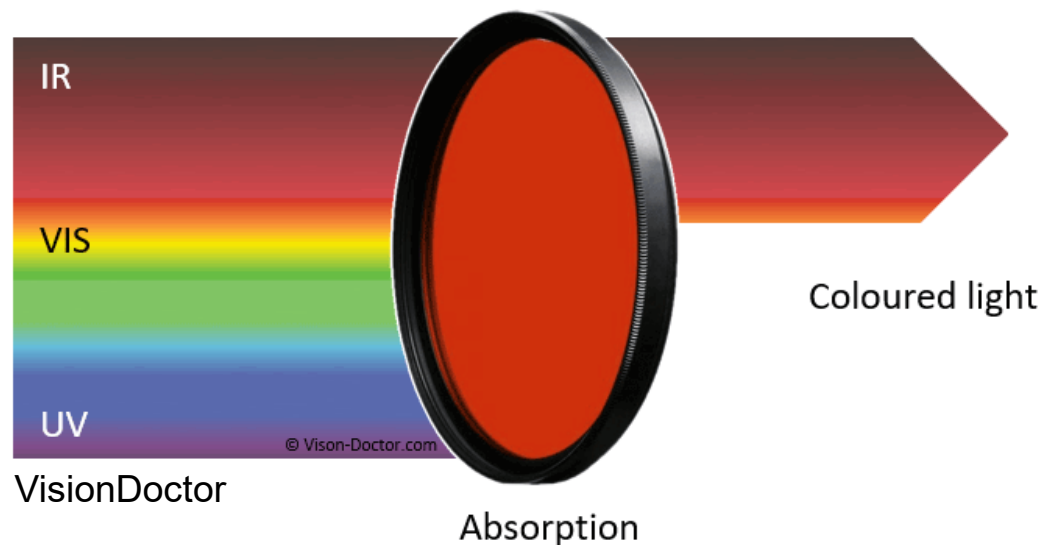
$$L_c = \lambda^2 / \Delta\lambda$$

- Pour augmenter la longueur de cohérence il faut utiliser un grand λ ou un filtre très étroit ($\Delta\lambda$ très petit)



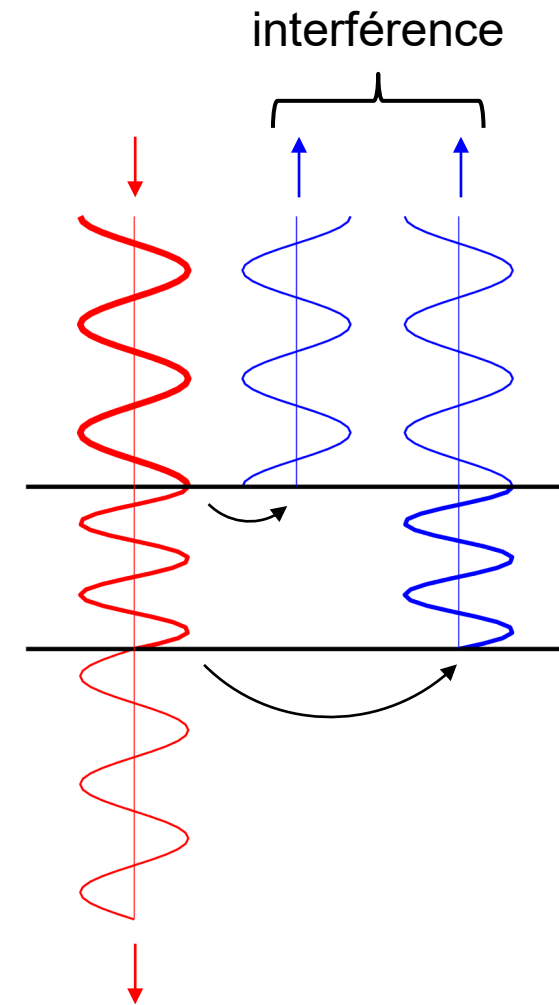
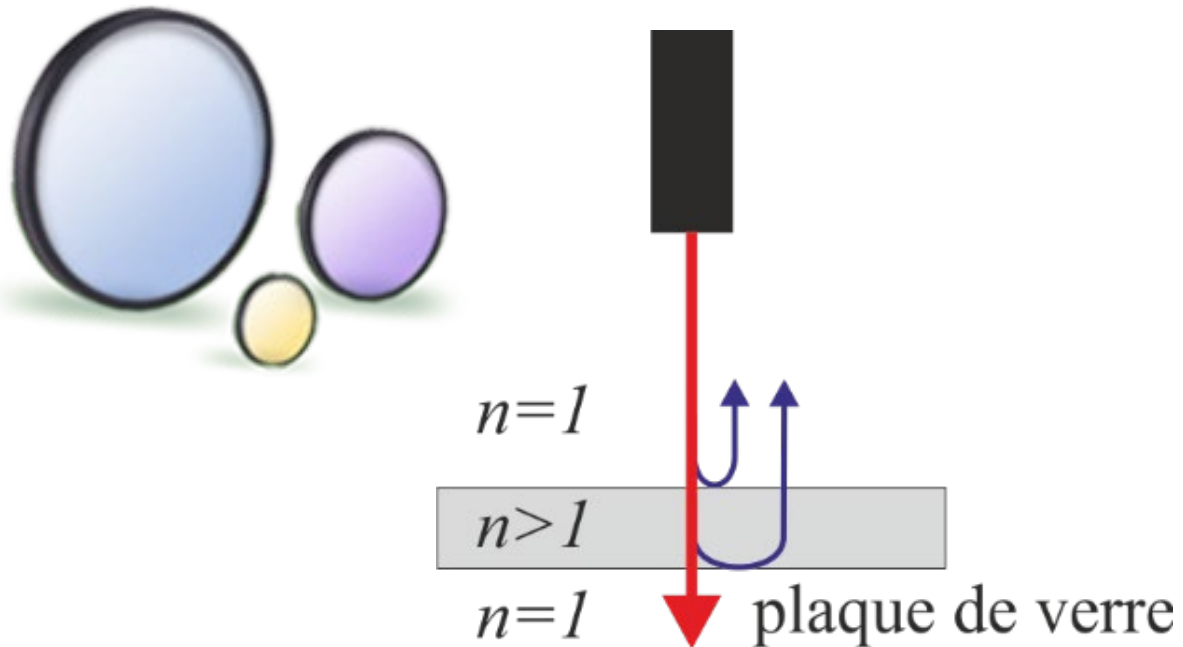
Filtres

- Il est souvent utile de ne sélectionner qu'une partie du spectre visible
- On peut le faire en utilisant un morceau de verre coloré (filtre) qui va absorber toutes les longueurs d'onde sauf une
- La sélection spectrale n'est cependant pas très bonne (pas étroite)



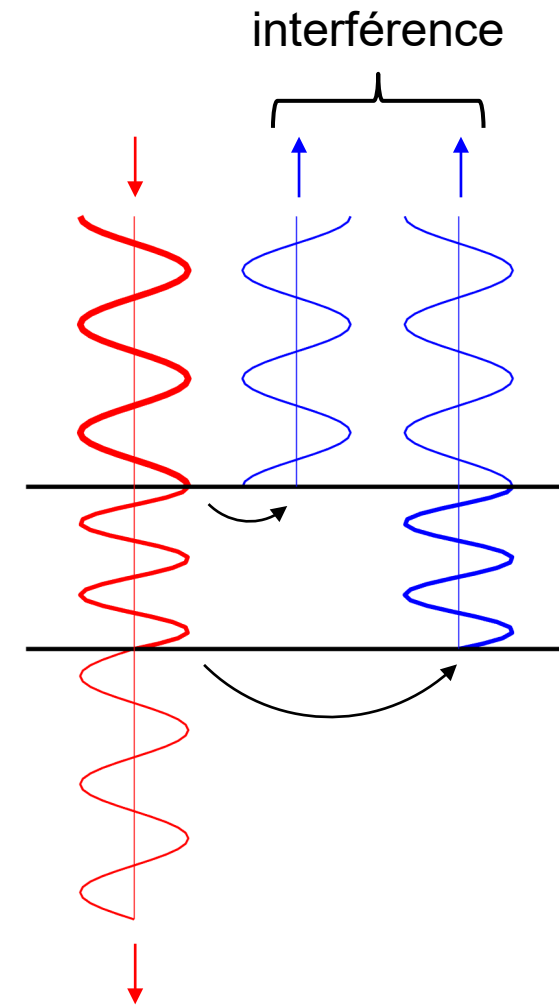
Filtre interférentiel

- Un filtre interférentiel permet d'obtenir une bien meilleure sélectivité spectrale
- La lumière est réfléchiée par chaque interface
- Ces ondes interfèrent de façon constructive ou destructive, permettant de sélectionner des fréquences très précises



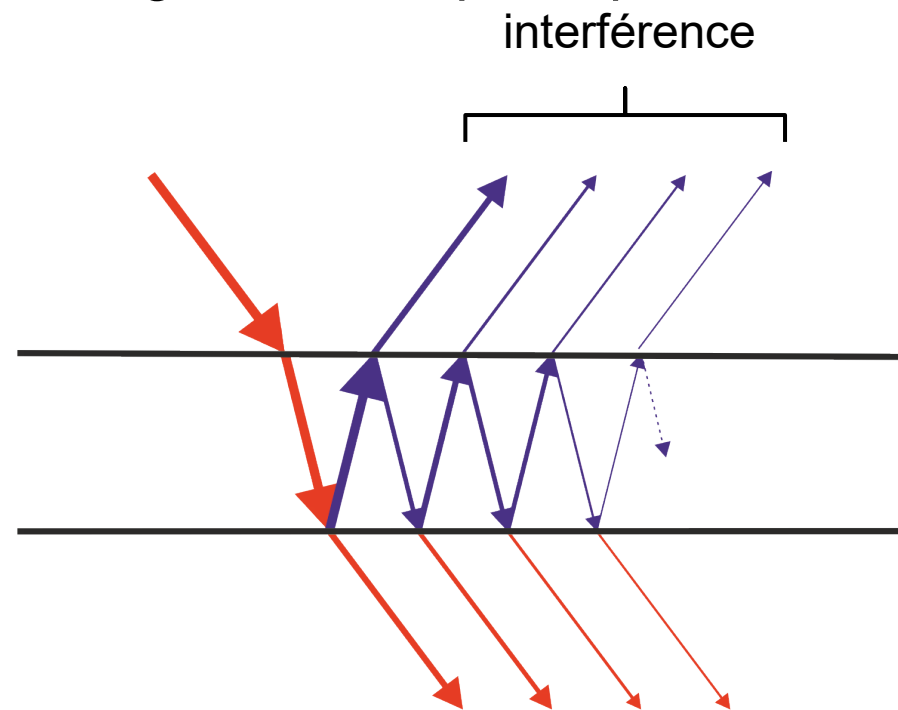
Filtre interférentiel

- L'interférence peut être constructive ou destructive, suivant:
 - L'épaisseur de la plaque
 - L'indice de réfraction de la plaque
 - La longueur d'onde
- Epaisseur minimale de la plaque pour créer une interférence est $\lambda/4$
- Le calcul exact nécessite les coefficients de Fresnel qui déterminent les amplitudes des ondes réfléchies et transmises...



Filtre interférentiel

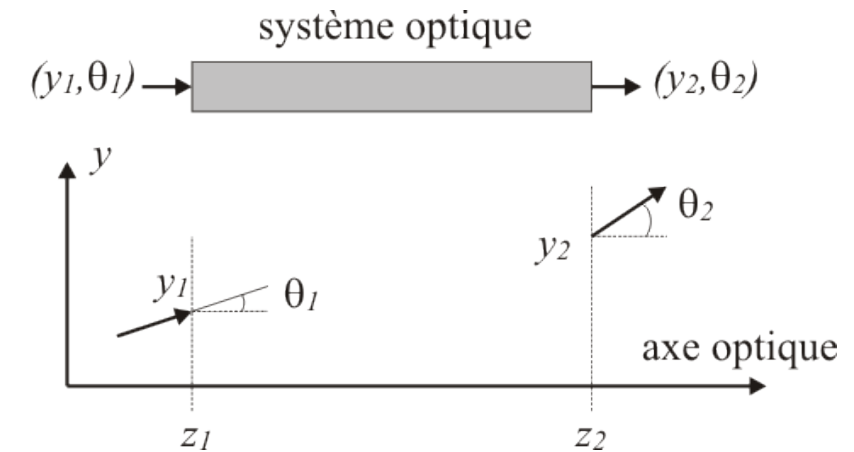
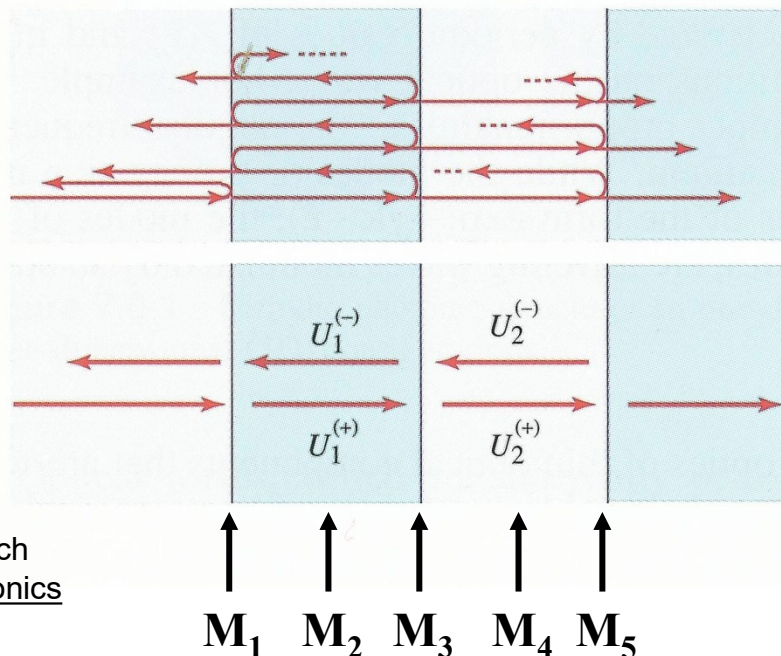
- En réalité, il y a une infinité d'ondes réfléchies et transmises (mais cette «série» d'ondes converge vers le résultat final)
- On le comprend mieux en regardant ce qui se passe sous une incidence oblique



- Un tel système s'étudie avec une approche matricielle appelée matrices de transfert ou de diffusion

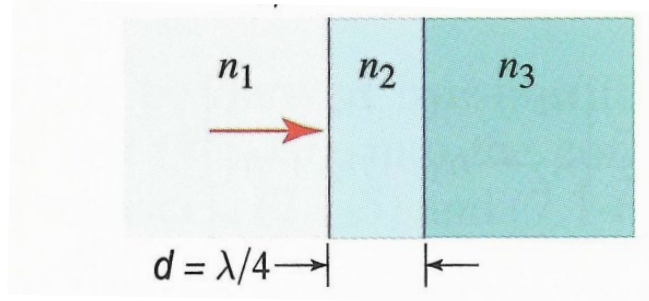
Matrice de transfert

- L'infinité d'ondes réfléchies et transmises peut être remplacée par une paire d'ondes allant dans une direction et dans l'autre
- A chaque élément du milieu stratifié (interface, propagation) on associe une matrice de diffusion et la réponse du système s'obtient par multiplication de toutes matrices
- Cette approche va au-delà de la méthode ABCD car on obtient les ondes qui se propagent dans les deux directions



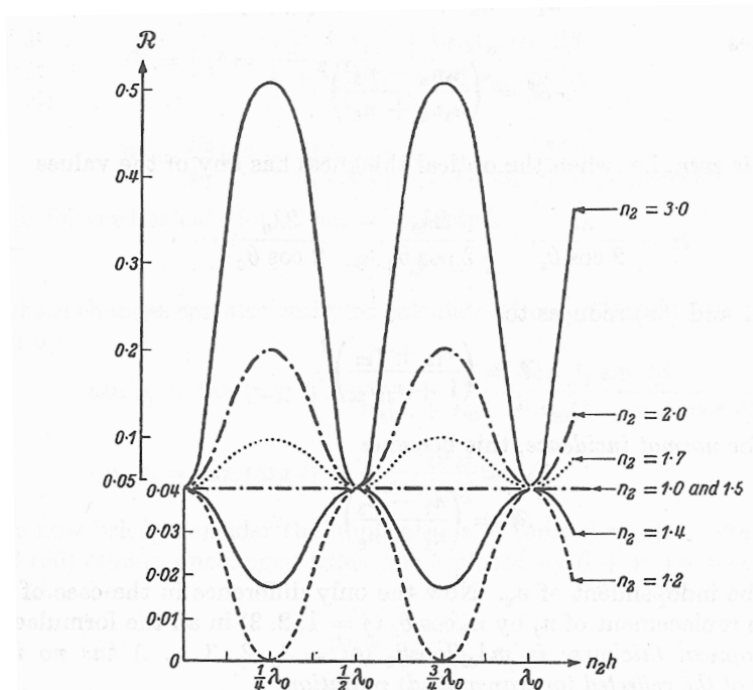
Filtre interférentiel

- lame quart-d'onde (couche anti-réfléchissante)



$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$$

- La réflectivité oscille de façon périodique, une épaisseur égale à $\lambda/4$ joue un rôle moteur ($\theta_1 = 0, n_1 = 1, n_3 = 1.5$)



Without anti-reflection

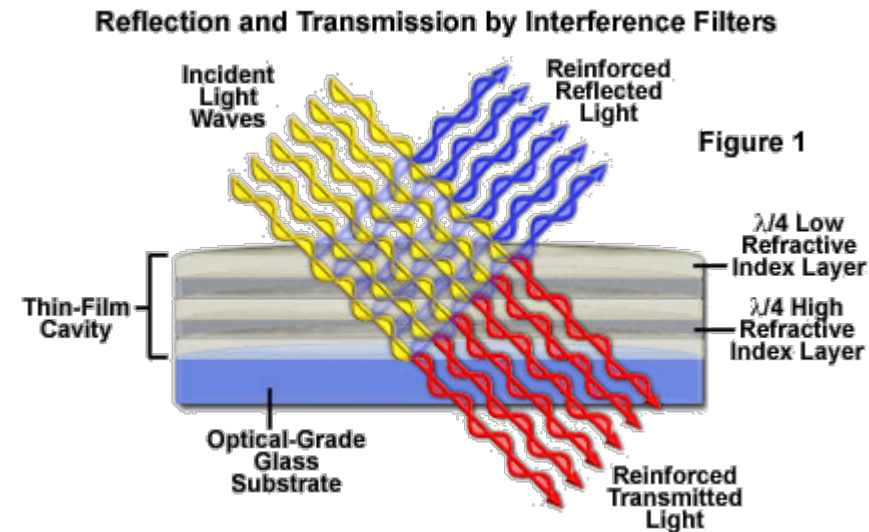
With anti-reflection

wiseeyesoptical.com

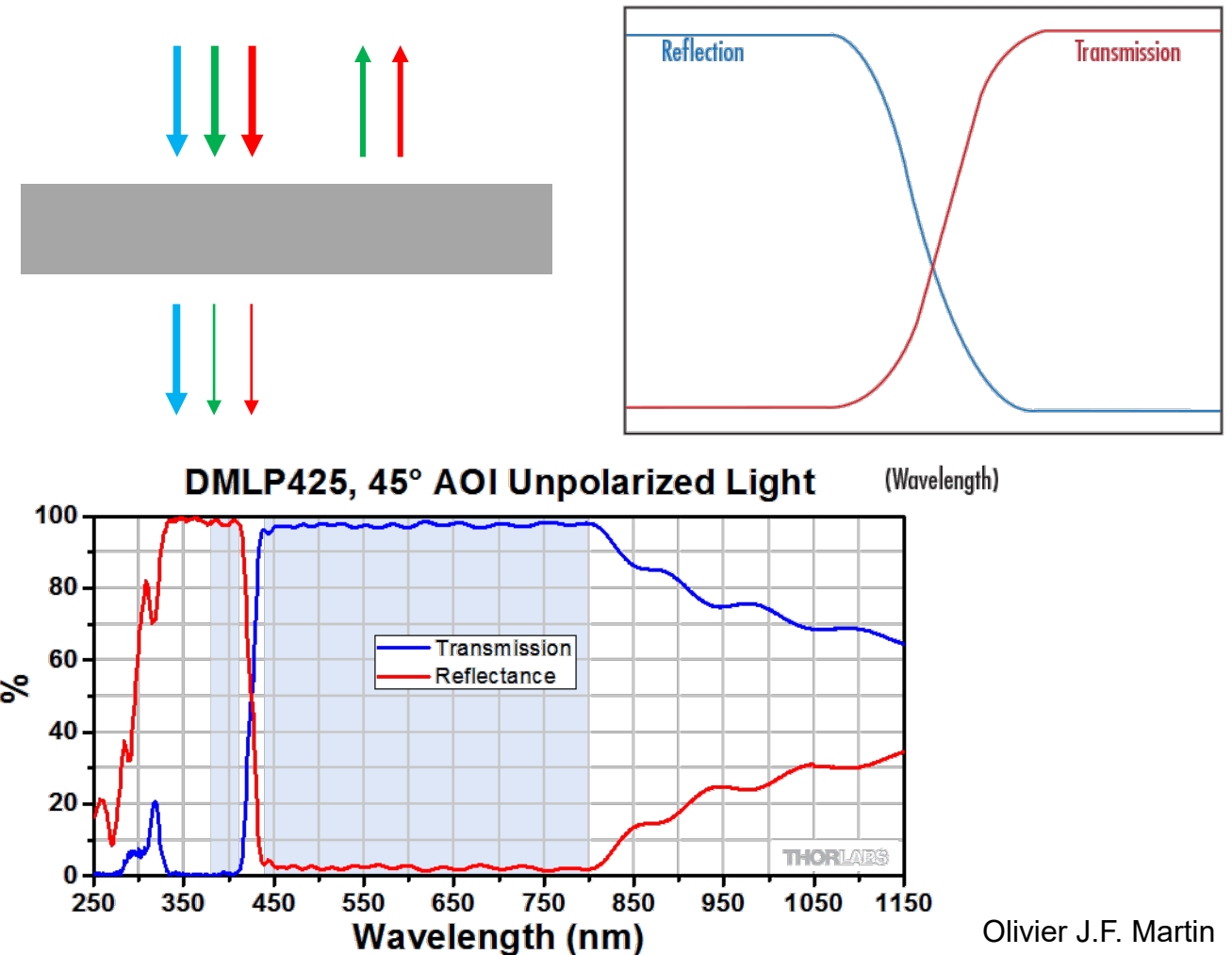
Born, Wolf, Principles of optics
(6th Ed., Pergamon Press, 1980)

Filtre interférentiel

- En ajoutant des couches (~10-20) on obtient une très bonne sélectivité spectrale
- S'il n'y a pas d'absorption dans les couches, l'énergie est conservée et la lumière est soit transmise, soit réfléchie



Olympus.com



Technologies pour la déposition des couches minces

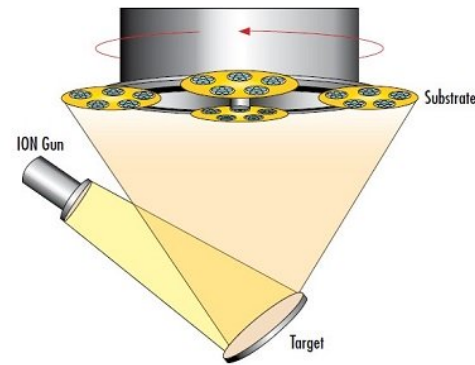
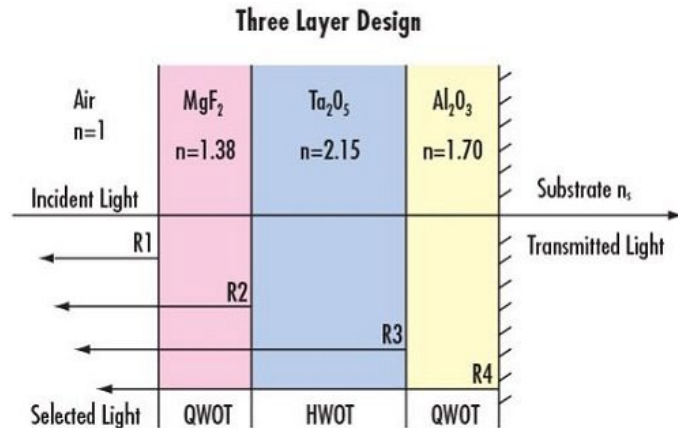


Figure 5: During ion beam sputtering (IBS), a strong electric field accelerates ions from an ion gun onto the target, which releases more ions that deposit a dense thin film coating on the rotating substrates

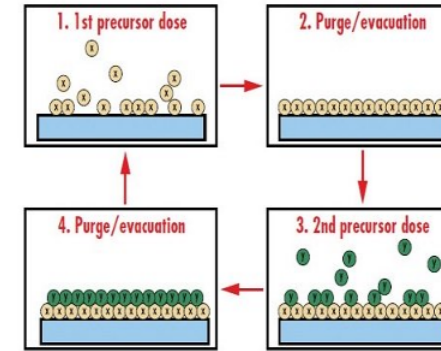


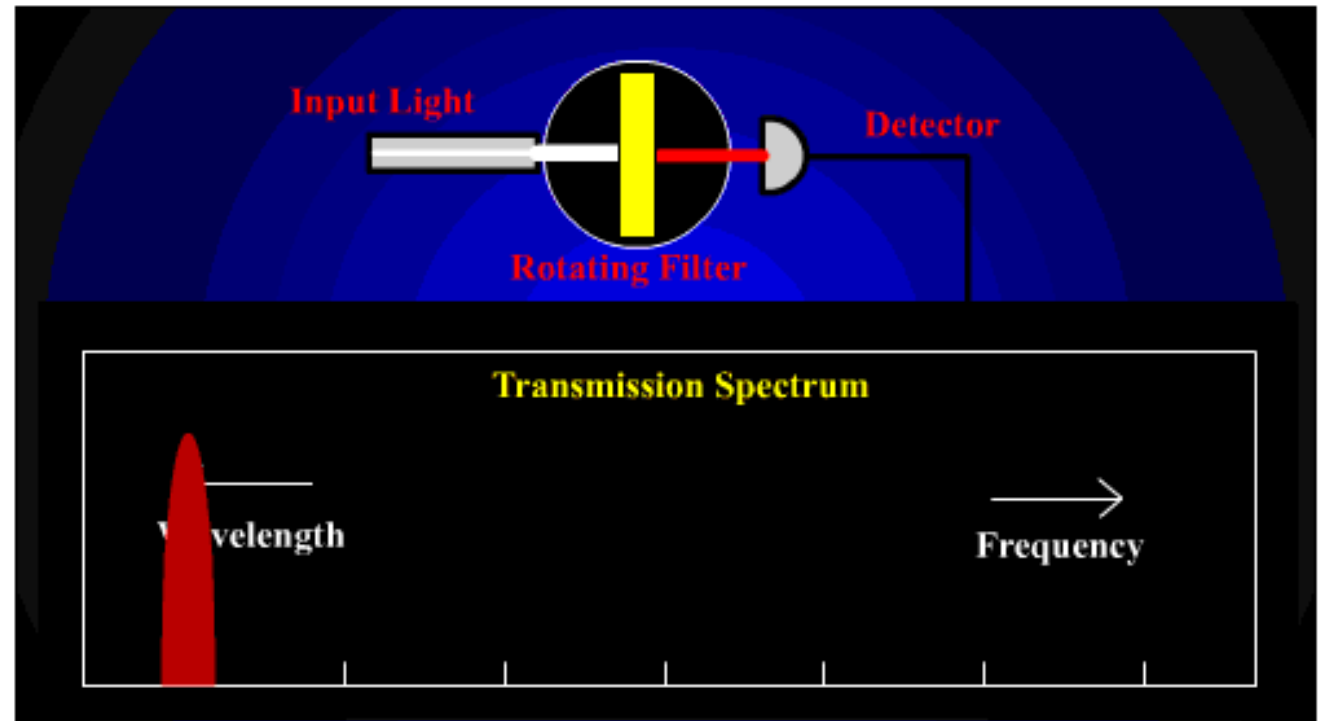
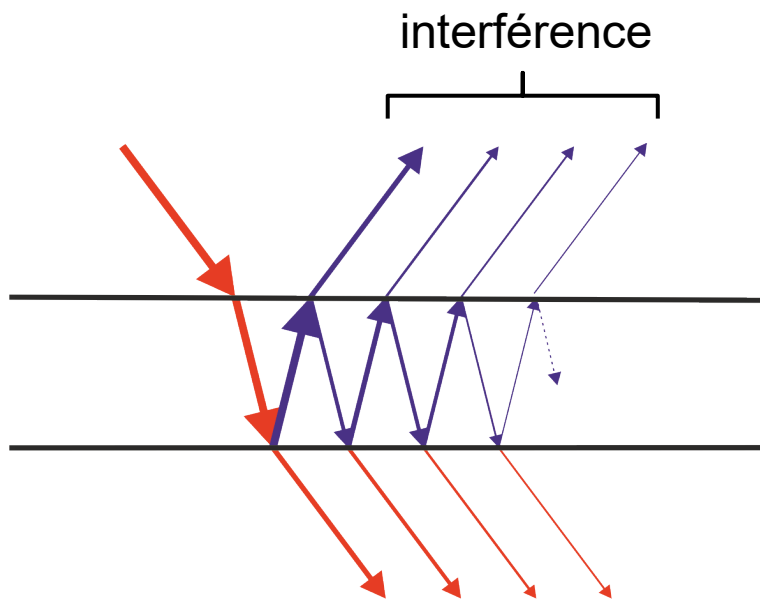
Figure 6: During atomic layer deposition (ALD), individual thin film layers are deposited by exposing the optics to different gaseous precursors, which results in a high level of control of layer thickness independent of the surface geometry of the optics

	Evaporative	Evaporative with IAD	Plasma Sputtering	IBS	ALD
Spectral Performance	Low	Medium	High	High-Very High	Very High
Coating Stress	Low	Medium	High	Very High	High
Repeatability	Medium	Medium	High	Very High	Very High
Process Time	Slow	Slow	Intermediate	Very Slow	Very Slow
Non-Flat Geometry Capabilities	Better	Better	Good	Bad	Best
Relative Price	\$	\$	\$\$	\$\$\$	\$\$\$

Table 1: Comparison of different coating technologies (IAD: ion assisted deposition, IBS: ion beam sputtering, ALD: atomic layer deposition)⁴

Filtre interférentiel

- Le chemin optique (longueur du trajet lumineux dans le verre) dépend de l'angle d'incidence
- En général, un filtre fonctionne bien à incidence normale...
- ... on peut cependant le tourner pour ajuster sa réponse spectralement ("épaisseur effective")



RP Photonics

Ingénierie optique

Semaine 4 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



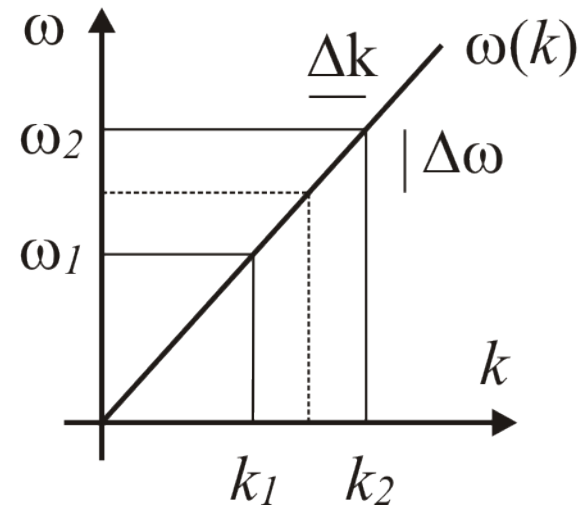
Battements

- Superposition de deux ondes de fréquences différentes:

$$U_1(z, t) = U_0 e^{j\omega_1 t - jk_1 z}$$

$$U_2(z, t) = U_0 e^{j\omega_2 t - jk_2 z} .$$

- En introduisant $2k_0 = k_1 + k_2$ $2\Delta k = k_2 - k_1$
 $2\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ $2\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$

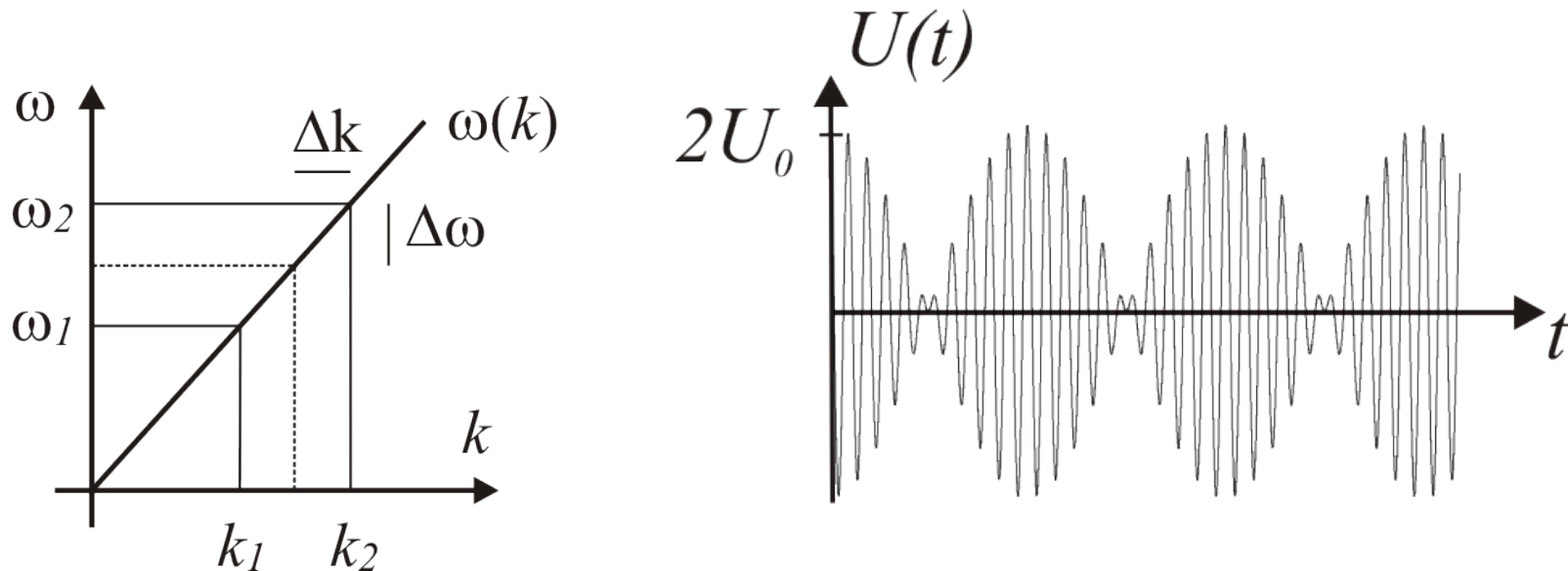


Battements

- Champ total:

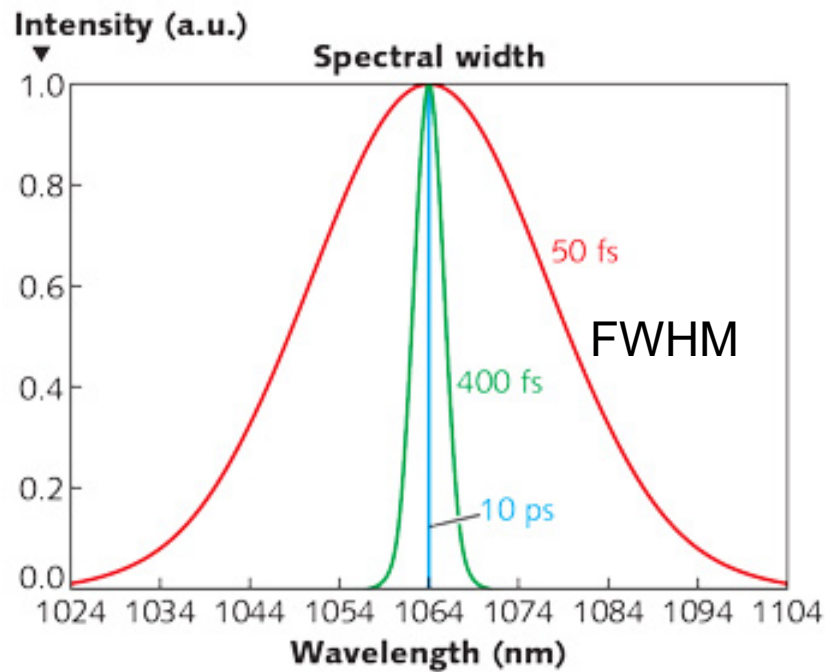
$$\begin{aligned} U(z, t) &= U_0 e^{j\omega_0 t - jk_0 z} (e^{j\Delta\omega t - j\Delta k z} + e^{-(j\Delta\omega t - j\Delta k z)}) \\ &= 2U_0 e^{j\omega_0 t - jk_0 z} \cos(\Delta\omega t - \Delta k z) . \end{aligned}$$

- Porteuse d'amplitude $2U_0$ caractérisée par ω_0 et k_0
- Modulation d'amplitude 1 et caractérisée par $\Delta\omega$ et Δk



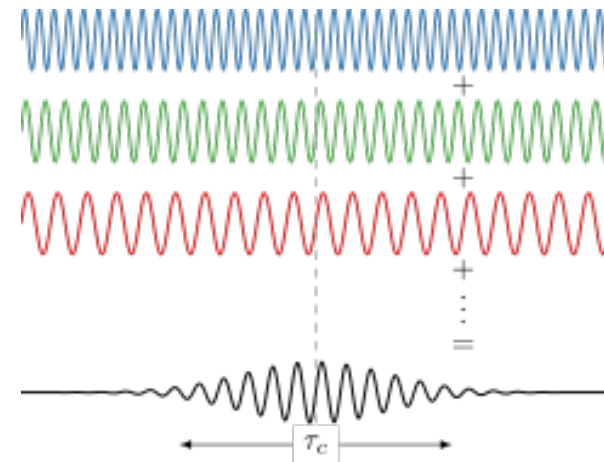
Génération de pulse

- En superposant plusieurs ondes de fréquences différentes couvrant une certaine largeur spectrale il est possible de créer un pulse de très courte durée temporelle
- Il existe une relation (qui dépend de la forme du pulse, ici on considère un pulse Gaussien) entre la largeur spectrale et la durée du pulse:



Laserfocusworld

$$\Delta \nu \Delta t \geq 0.44$$

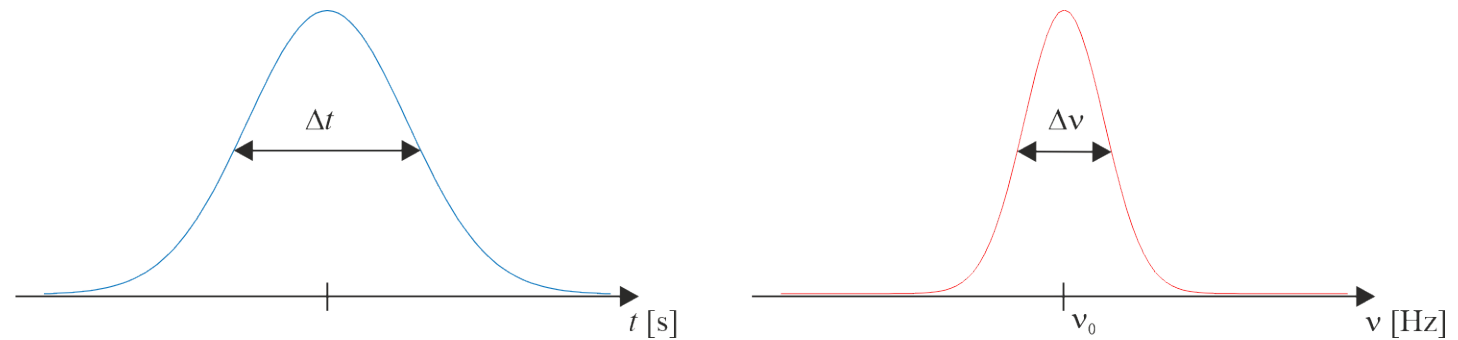


Wikimedia

Effet de la dispersion

- L'effet de la dispersion est très important pour la transmission de pulses de lumière, donc pour la transmission de l'information !
- Plus le pulse est court, plus cet effet est important: en effet, un pulse très court dans l'espace temporel est large dans l'espace des fréquences (il contient beaucoup de composantes spectrales), les deux sont reliés par la transformée de Fourier:

$$\tilde{E}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int d\omega E(t) e^{j\omega t}$$



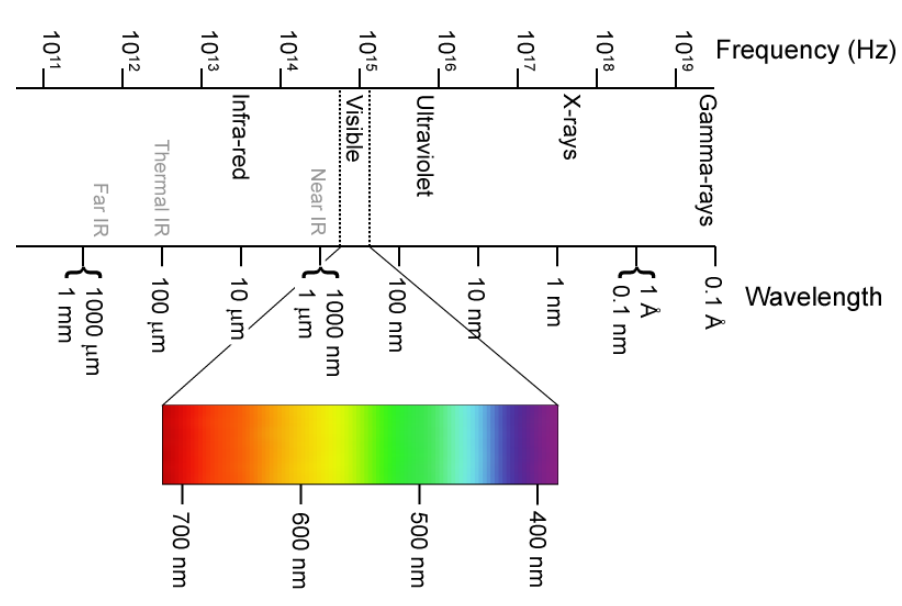
- La largeur de chaque pulse est en général définie par la full-width at half maximum (FWHM)
- Le produit des deux largeurs est constant pour une forme de pulse donnée

Effet de la dispersion

- Exemple d'un pulse Gaussien: $\Delta t \Delta \nu \geq 0.44$
- On dit qu'un pulse est «time-bandwidth limited» lorsqu'on a exactement l'égalité ci-dessus

Durée du pulse Δt	Largeur spectrale $\Delta \nu$	$\Delta \lambda$ ($\lambda_0=1550$ nm)
1 ps	0.44 THz	3.53 nm
100 fs	4.4 THz	35.3 nm
40 as	11 PHz	88.2 μm

- Un pulse extrêmement court contient des composantes spectrales qui peuvent couvrir l'entier du spectre visible!



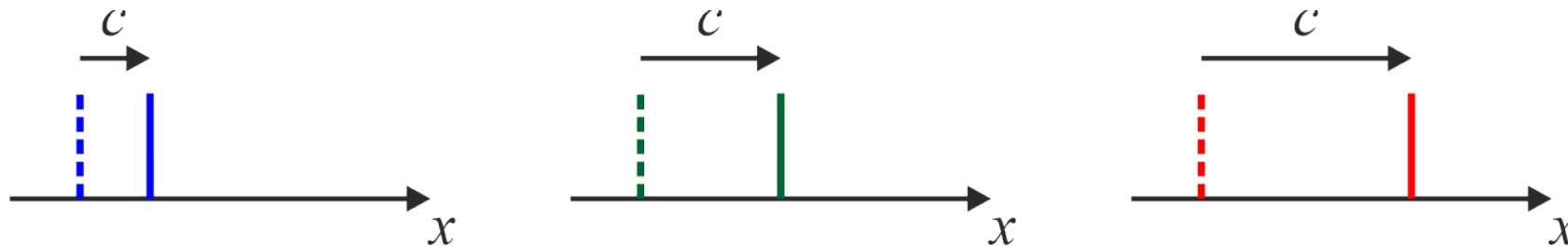
Effet de la dispersion

- Une onde monochromatique se propage à une vitesse bien définie qui dépend de l'indice de réfraction à la fréquence de l'onde:

$$c = \frac{c_0}{n(\omega)} \quad (\text{www.refractiveindex.info})$$

Couleur	$\lambda[\mu\text{m}]$	$n(\lambda)$
bleu	0.475	1.5232
vert	0.510	1.5208
rouge	0.650	1.5145

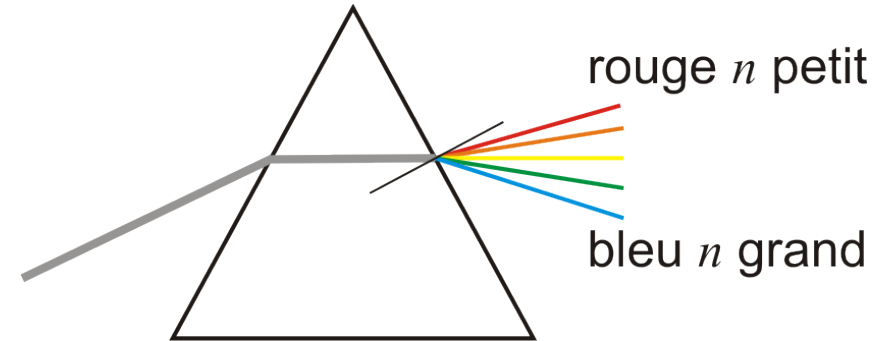
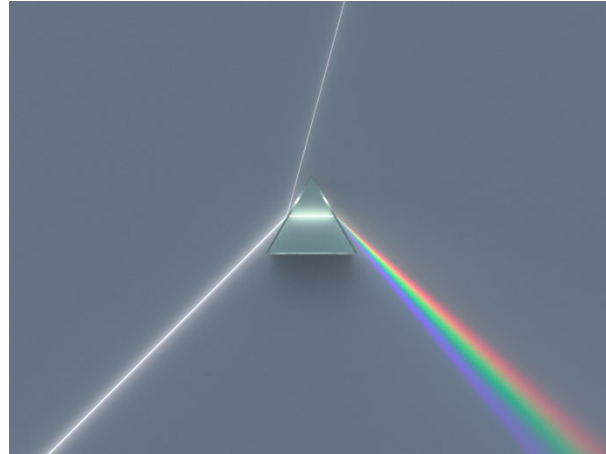
- Les courtes longueurs d'onde (bleu) vont plus lentement que les grandes longueurs d'onde (rouge):



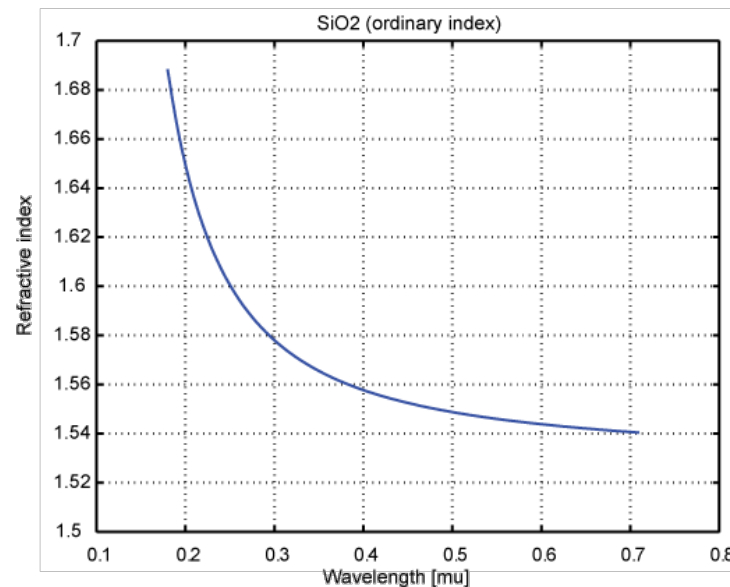
- Ainsi un pulse se déforme et s'élargit durant sa propagation

Dispersion des matériaux

- En optique, tout matériau est dispersif
- En général l'indice augmente avec la fréquence

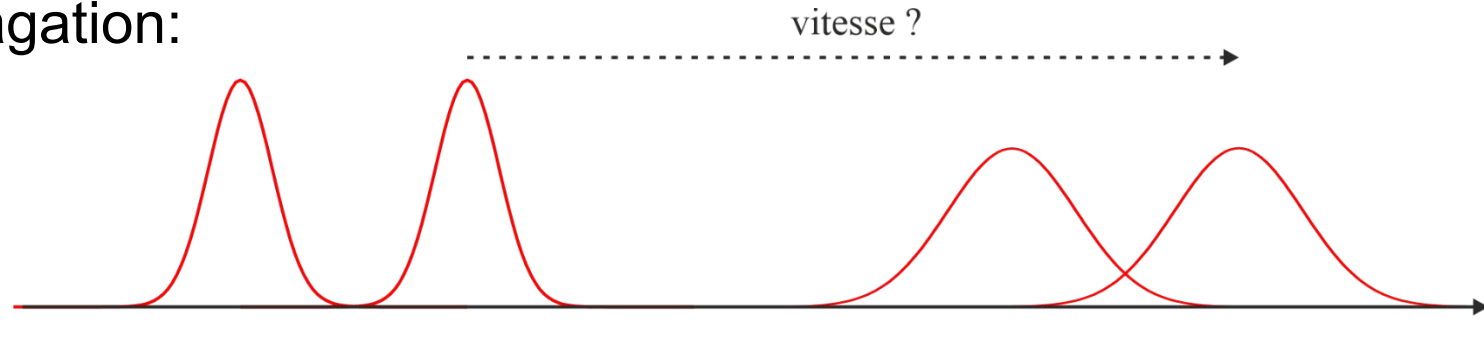


- Dispersion de la silice:



Effet de la dispersion

- Cet élargissement du pulse limite la vitesse à laquelle on peut moduler la lumière, puisque des pulses qui étaient bien séparés dans le temps peuvent se chevaucher après propagation:



- Cette variation du pulse ne se remarque que dans l'espace temporel, pas dans l'espace des fréquences, où le profil du pulse reste constant:

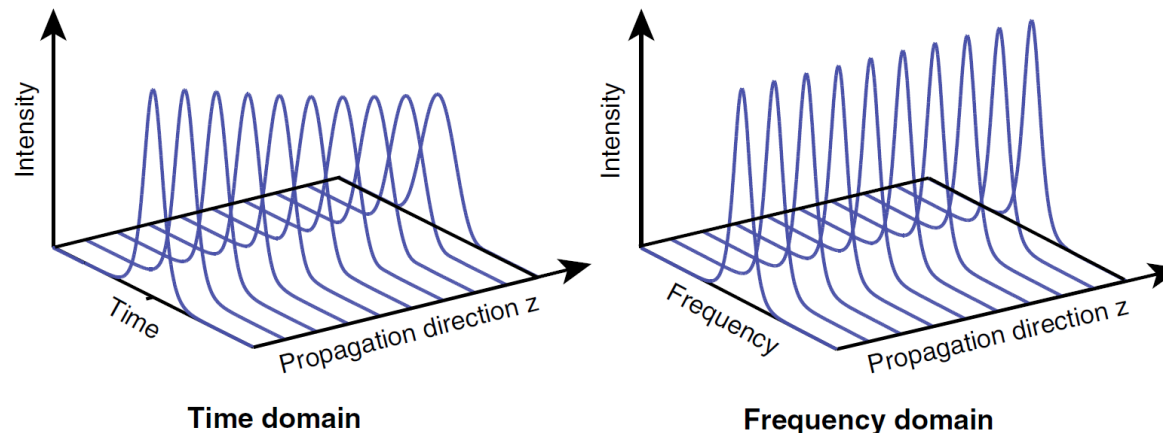
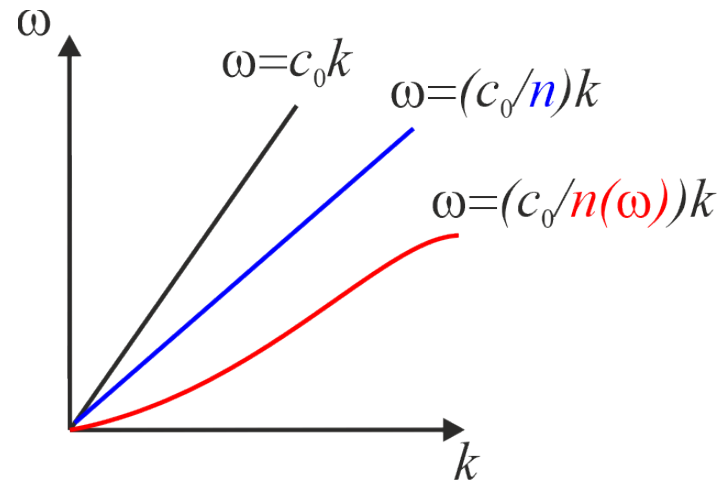


Diagramme de dispersion

- La relation entre quantité de mouvement et énergie d'une onde plane $k = \frac{\omega}{c}$ peut se représenter dans un diagramme de dispersion:



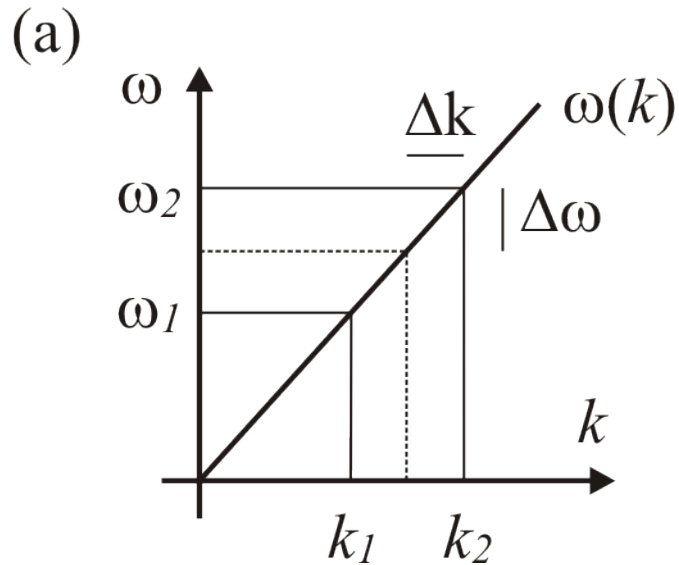
- Lorsque le milieu est dispersif (l'indice de réfraction dépend de la fréquence), la courbe de dispersion peut devenir plus compliquée qu'une simple droite

Vitesse de groupe

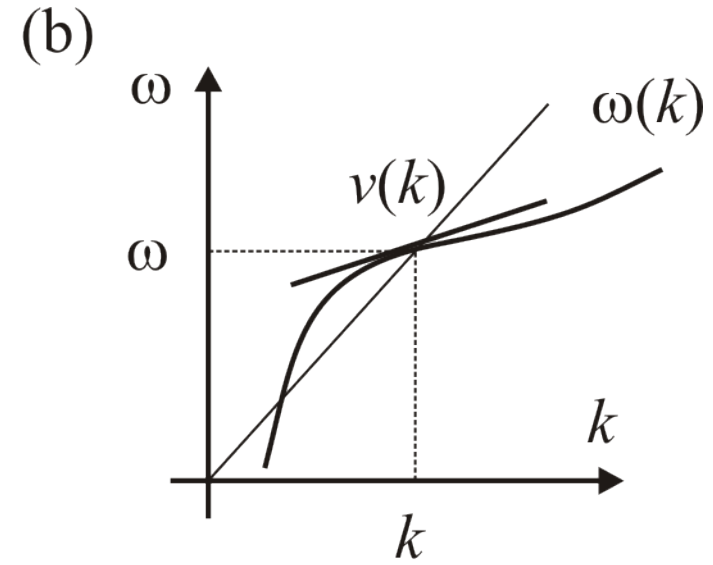
- Comment définir la vitesse d'un pulse, i.e. la vitesse à laquelle l'enveloppe du pulse se déplace (= vitesse de l'information)

- $$v = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$
 Vitesse de groupe
$$c = \frac{\omega}{k}$$
 Vitesse de phase

Milieu non dispersif:



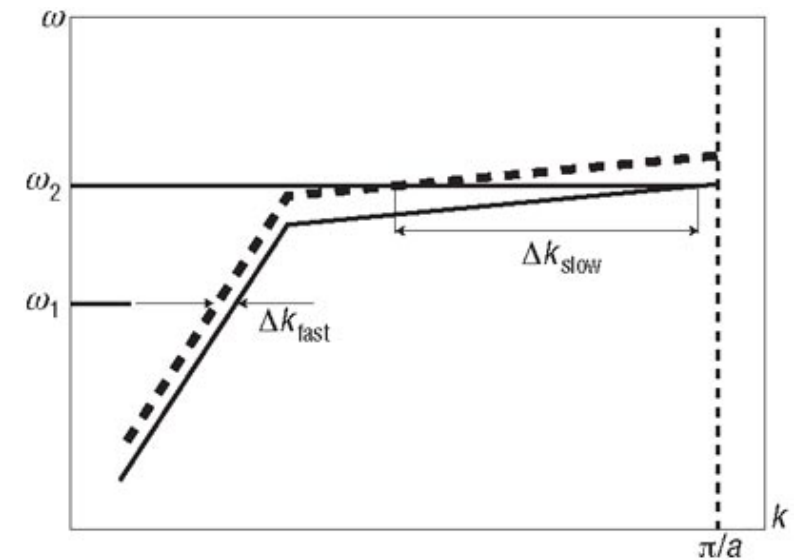
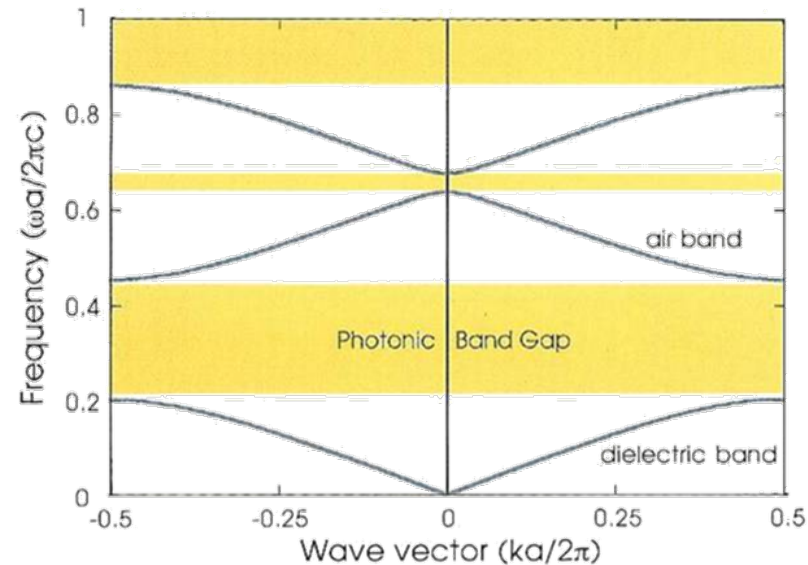
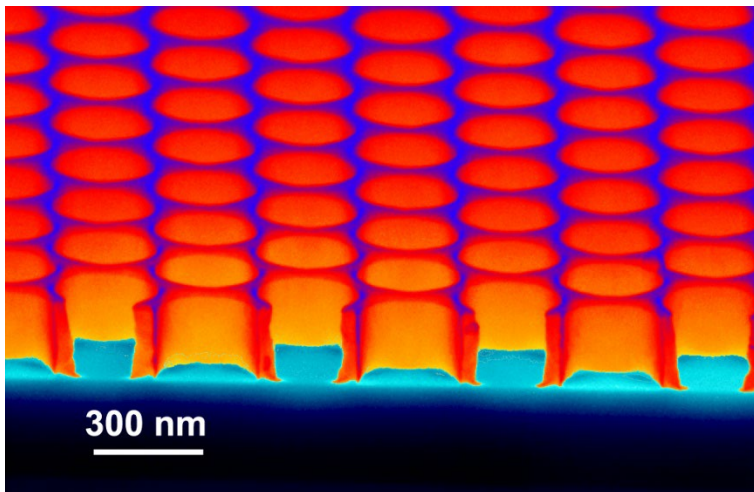
Milieu dispersif:



- Dans les milieux dispersifs, la vitesse de groupe est différente de la vitesse de phase

Cristaux photonics

- Arrangements périodiques de microstructures qui ont le même effet sur la lumière qu'un semiconducteur sur les électrons → structure de bande
- Proche du band-edge, la vitesse de groupe peut devenir très petite (la lumière est ralentie)



John D. Joannopoulos et al., Photonic Crystals: Molding the Flow of Light
(Princeton University Press, 1995)

Cristaux photonics

- Observation de «ultra-slow light» avec une vitesse de groupe égale à $c_0/1000$!

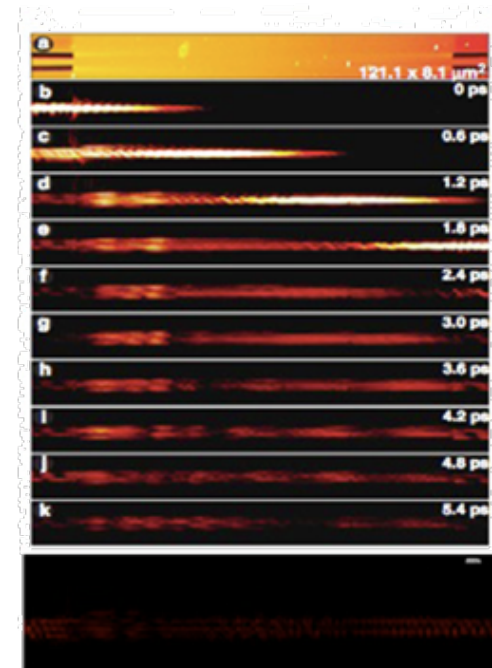
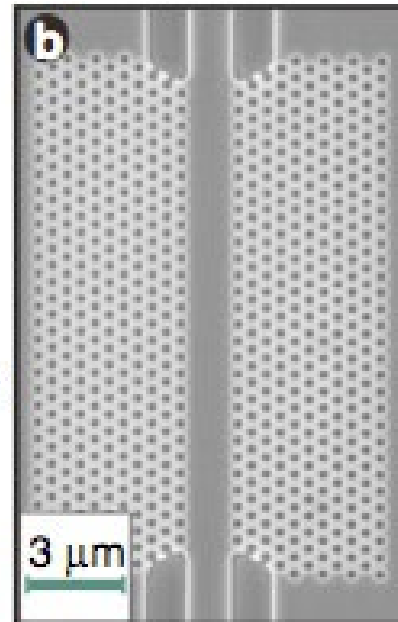
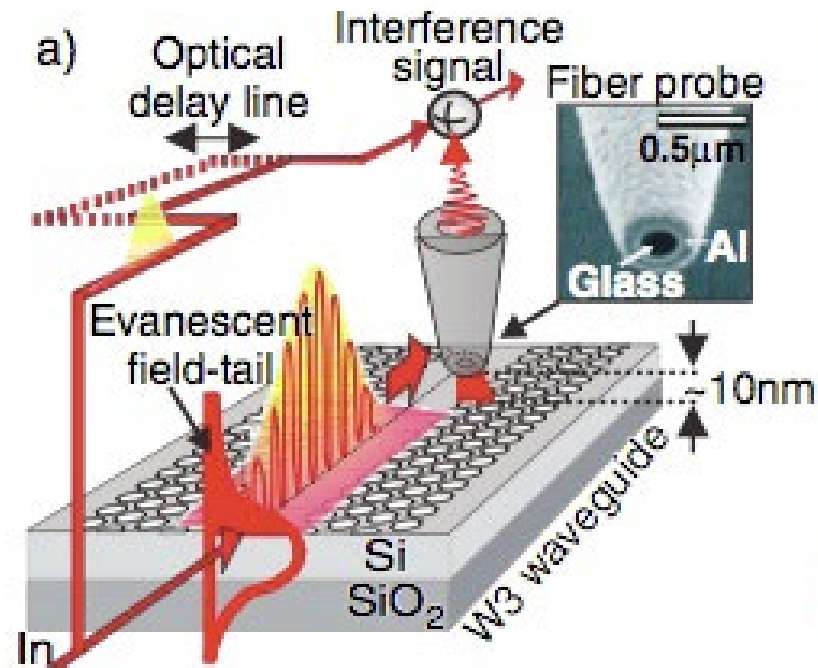
PRL 94, 073903 (2005)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
25 FEBRUARY 2005

Real-Space Observation of Ultraslow Light in Photonic Crystal Waveguides

H. Gersen,^{1,*} T. J. Karle,² R. J. P. Engelen,¹ W. Bogaerts,³ J. P. Korterik,¹ N. F. van Hulst,¹ T. F. Krauss,² and L. Kuipers^{1,4,†}



Propagation du son

- Dans le cas de deux diapasons de fréquences différents, la dispersion du son dans l'air est négligeable
- Chaque onde se propage à la même vitesse
- Le battement se propage aussi à la même vitesse
- La vitesse de groupe est égale à la vitesse de phase



Ingénierie optique

Semaine 4 – partie 3

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Holographie

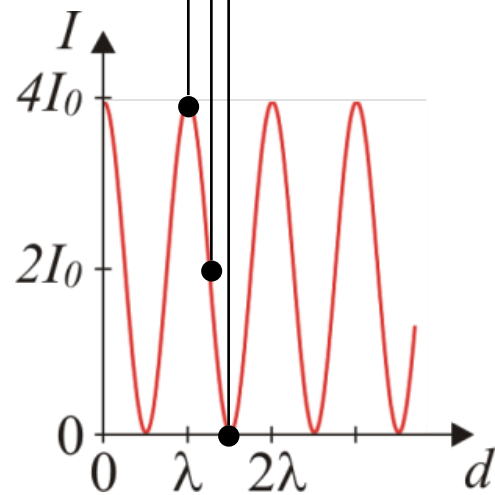
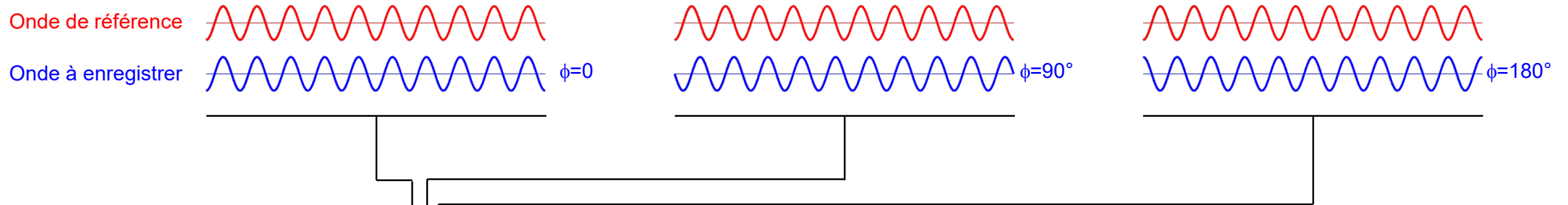
- La phase d'une onde nous dit combien l'onde a voyagé, elle permet donc de reconstruire le trajet de l'onde en 3D
- Une photo n'enregistre que l'intensité, comment enregistrer l'amplitude et la phase?
- L'holographie enregistre justement l'amplitude et la phase d'une onde objet

Fig. 1.7. Professor Gabor with his holographic portrait; this hologram was produced by R. Rinehart at the McDonnell Douglas Electronics Company in 1971, using a pulsed laser.

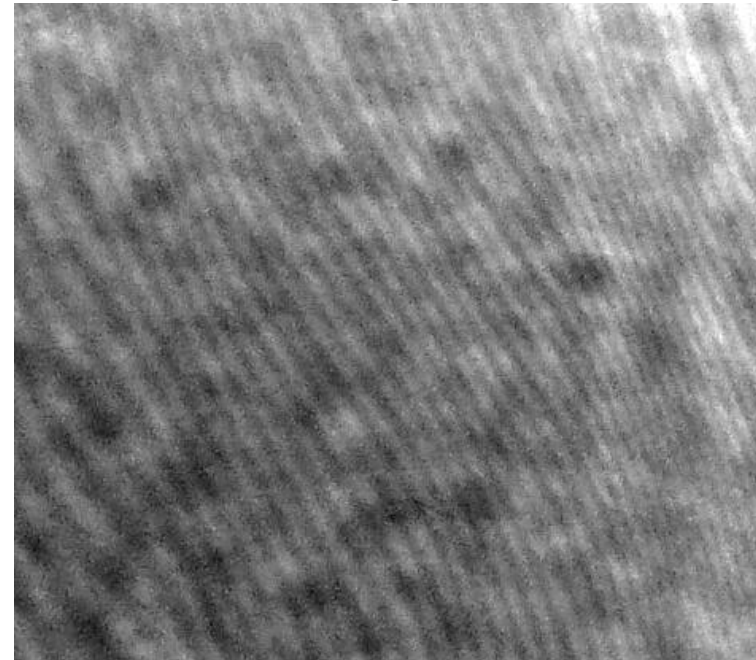


Holographie

- Pour enregistrer l'amplitude et la phase d'une onde, on fait une interférence avec une onde de référence et on enregistre l'interférence, plutôt que l'onde originale



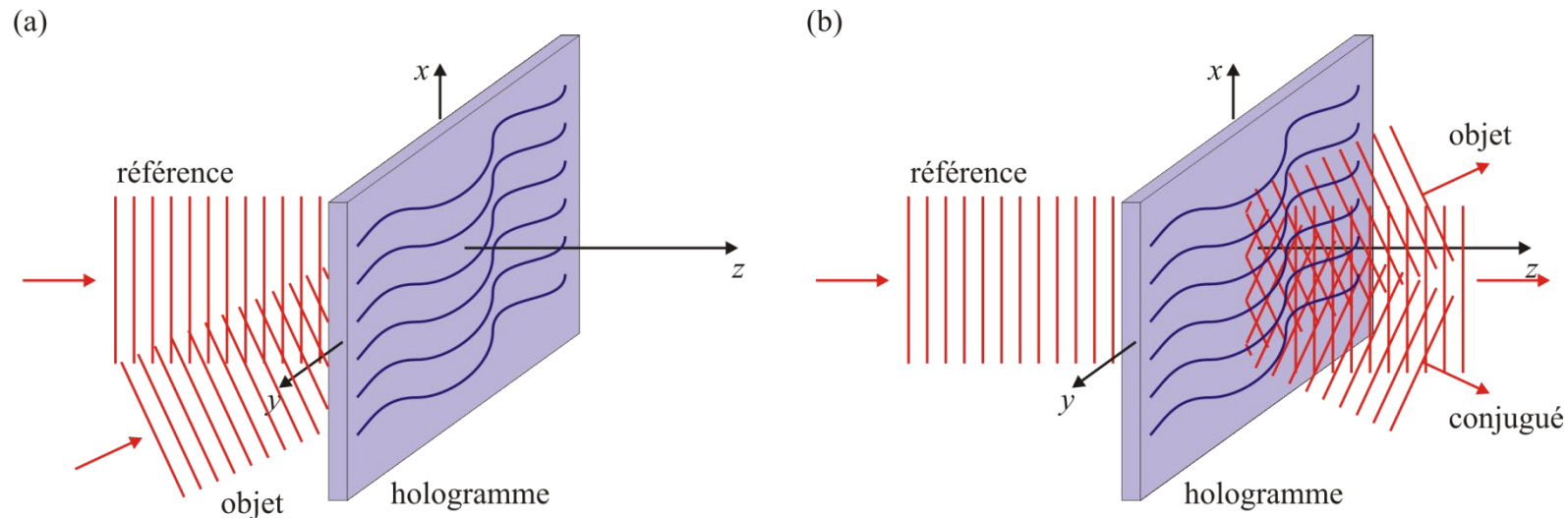
Surface d'un hologramme



Hologramme

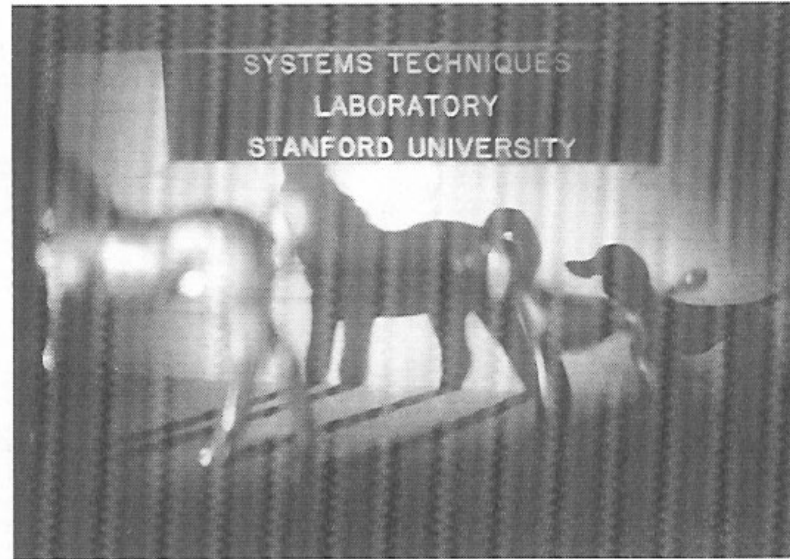
- Onde objet monochromatique complexe (amplitude + phase) $U_o(x, y)$
- On enregistre l'onde complexe en faisant une interference avec une onde de référence:
$$t \propto |U_o + U_r|^2 = |U_r|^2 + |U_o|^2 + U_r^* U_o + U_r U_o^* = I_r + I_o + U_r^* U_o + U_r U_o^* .$$
- On lit l'image en illuminant avec la même onde de reference:

$$U = U_r t \propto U_r I_r + U_r I_o + I_r U_o + U_r^2 U_o^* .$$

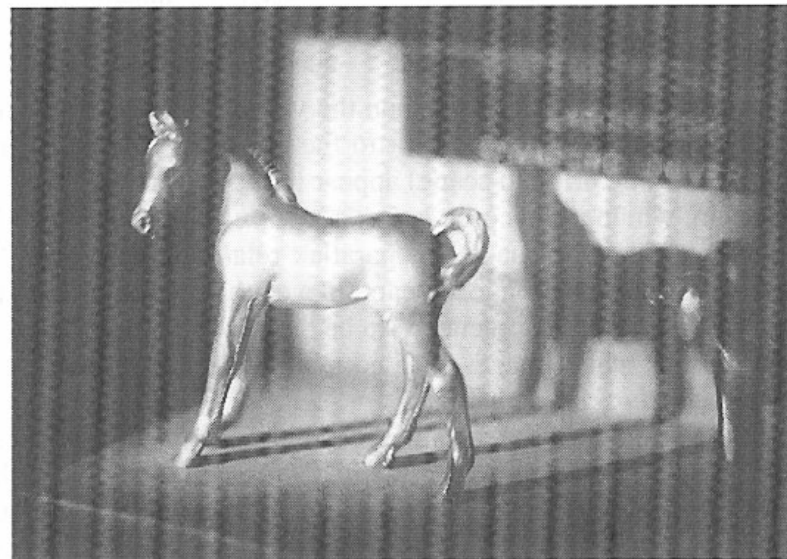


L'objet 3D est recréé en entier

- En observant (ou en prenant en photo) l'hologramme, on peut mettre au point sur différentes parties (le premier plan, l'arrière plan, etc...)
- L'hologramme représente donc l'objet en entier, avec son amplitude et sa phase



(a)

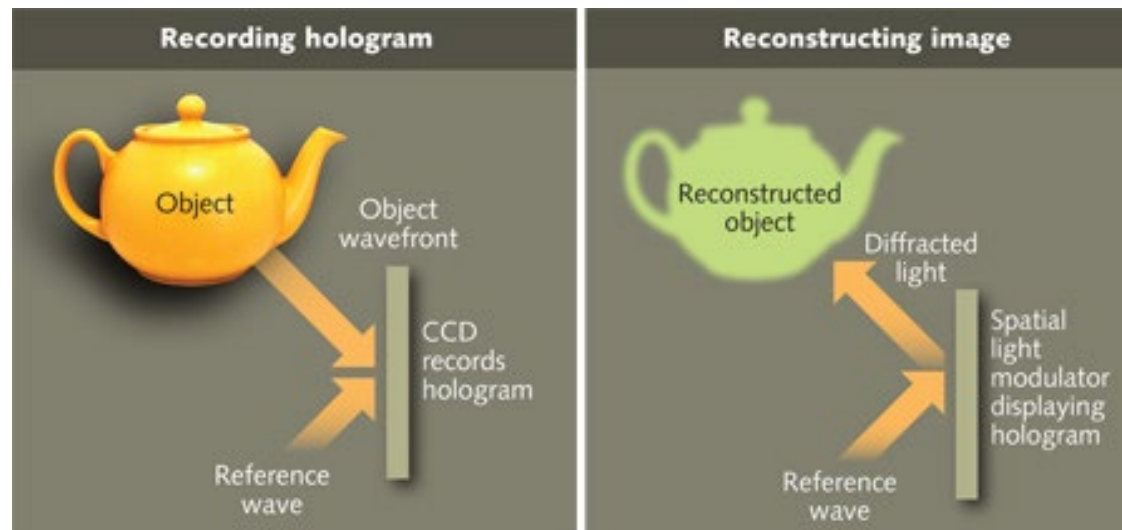
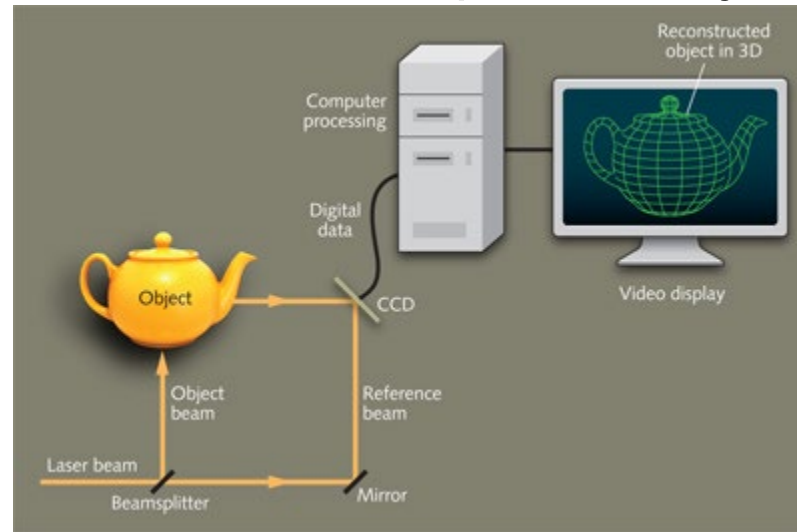


(b)

J.W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (2nd Ed. Mc Graw Hill, 1996)

Holographie digitale

- On peut enregistrer l'hologramme sur une caméra CCD ou même calculer l'hologramme à partir d'un modèle numérique de l'objet

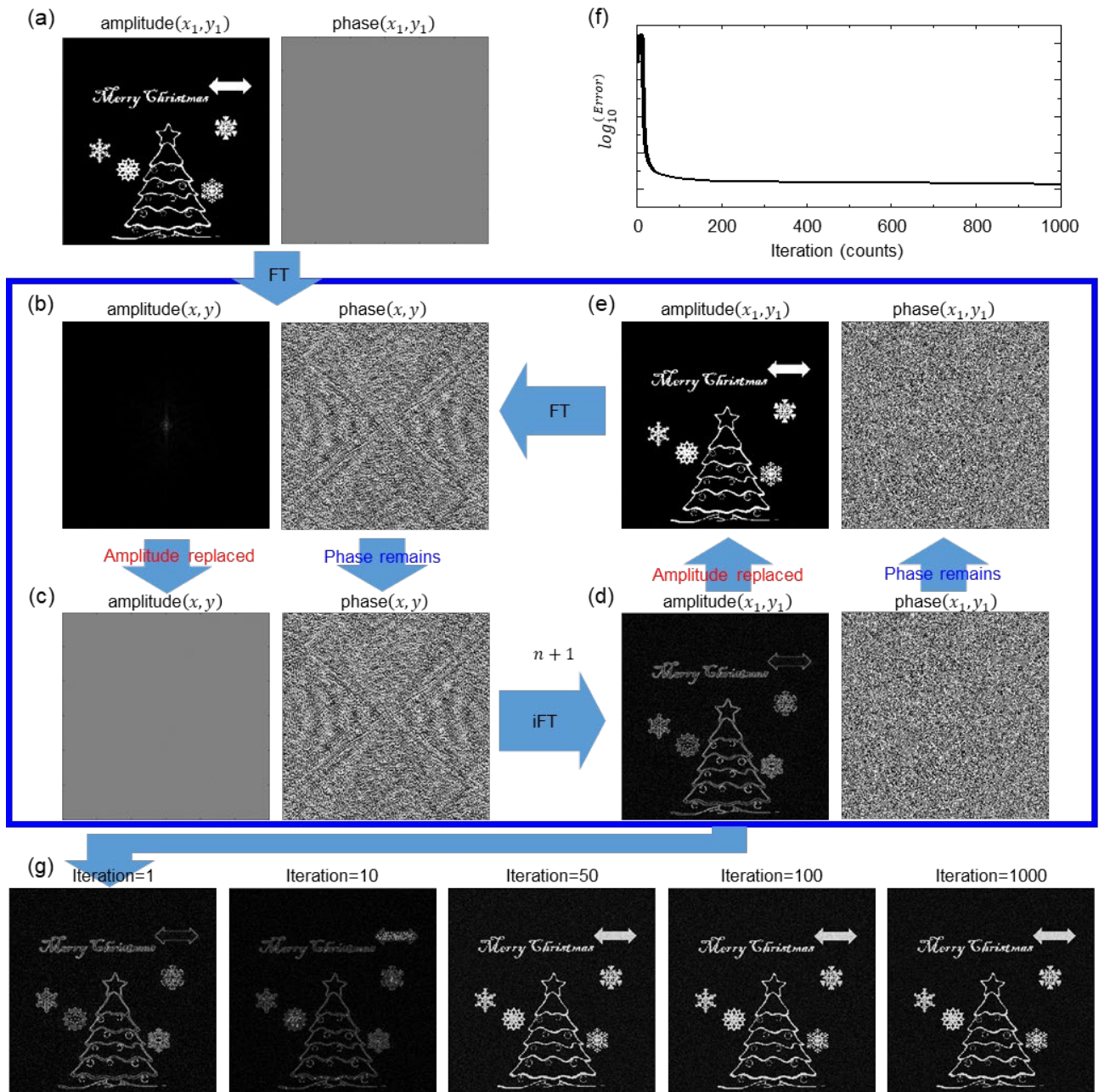
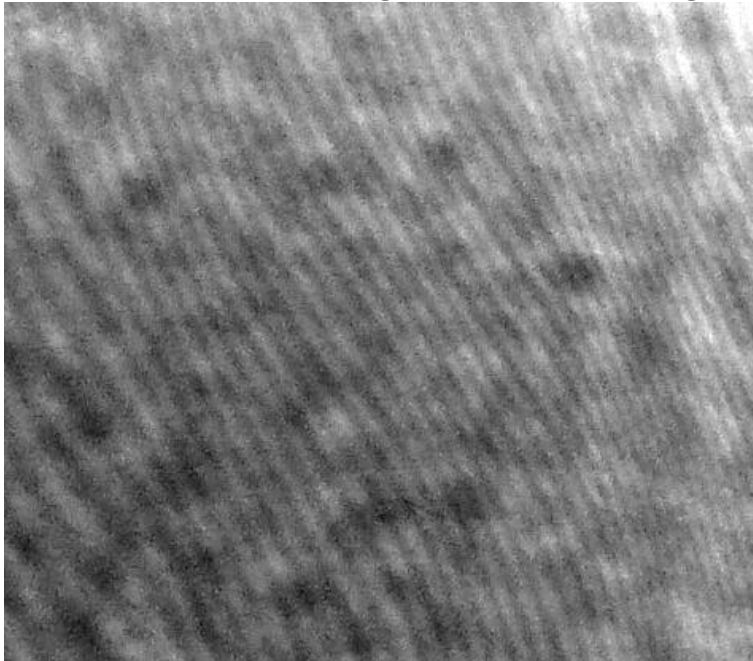


laserfocusworld.com

Holographie digitale

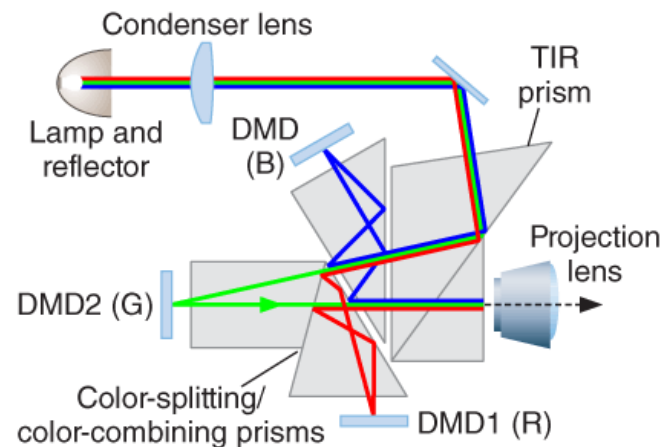
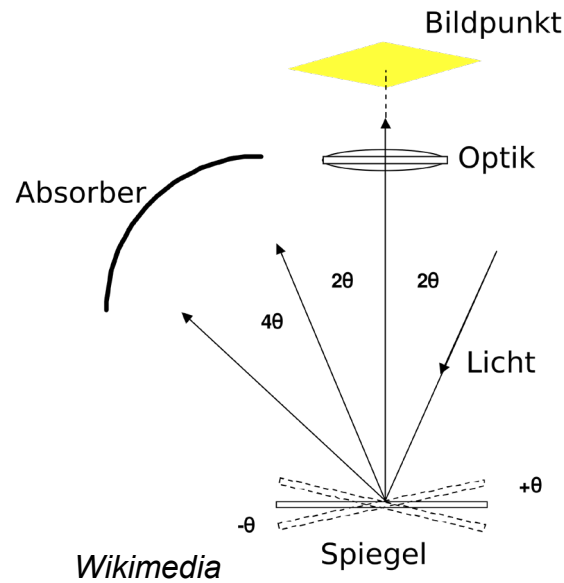
- Il est possible de créer un hologramme «digital» dans lequel on discrétise la phase uniquement ou l'amplitude uniquement

Surface d'un hologramme analogique

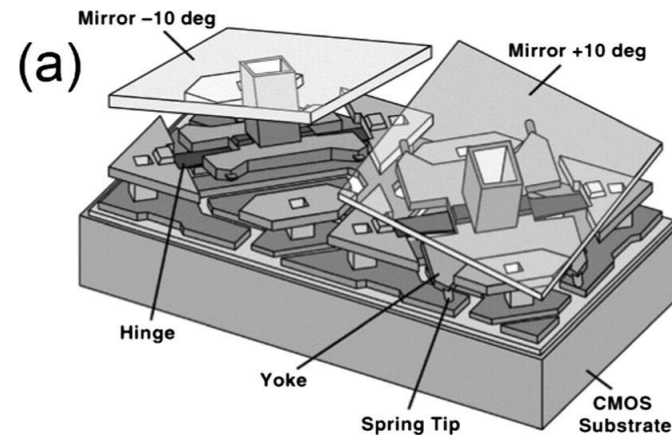
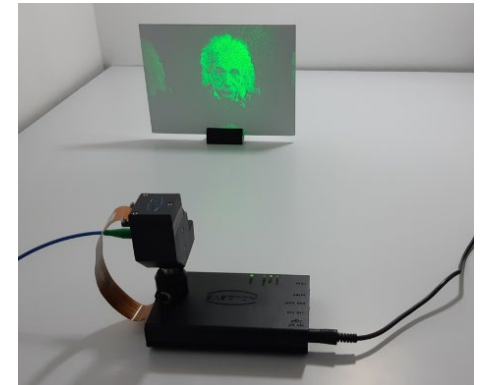


Spatial light modulator (SLM)

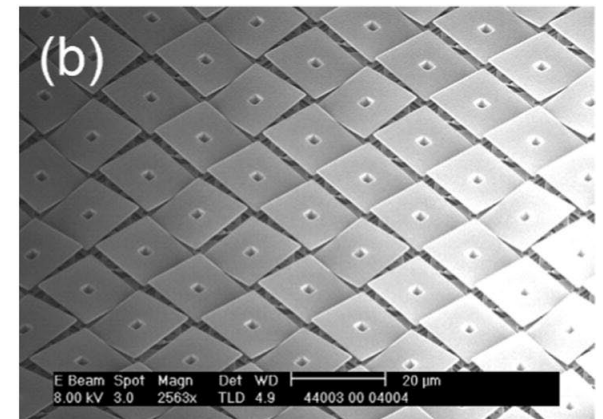
- Il existe essentiellement deux types: à cristaux liquides ou à micro-miroirs (Digital Micromirror Device, DMD), matrice de pixels adressables individuellement



Holoeye

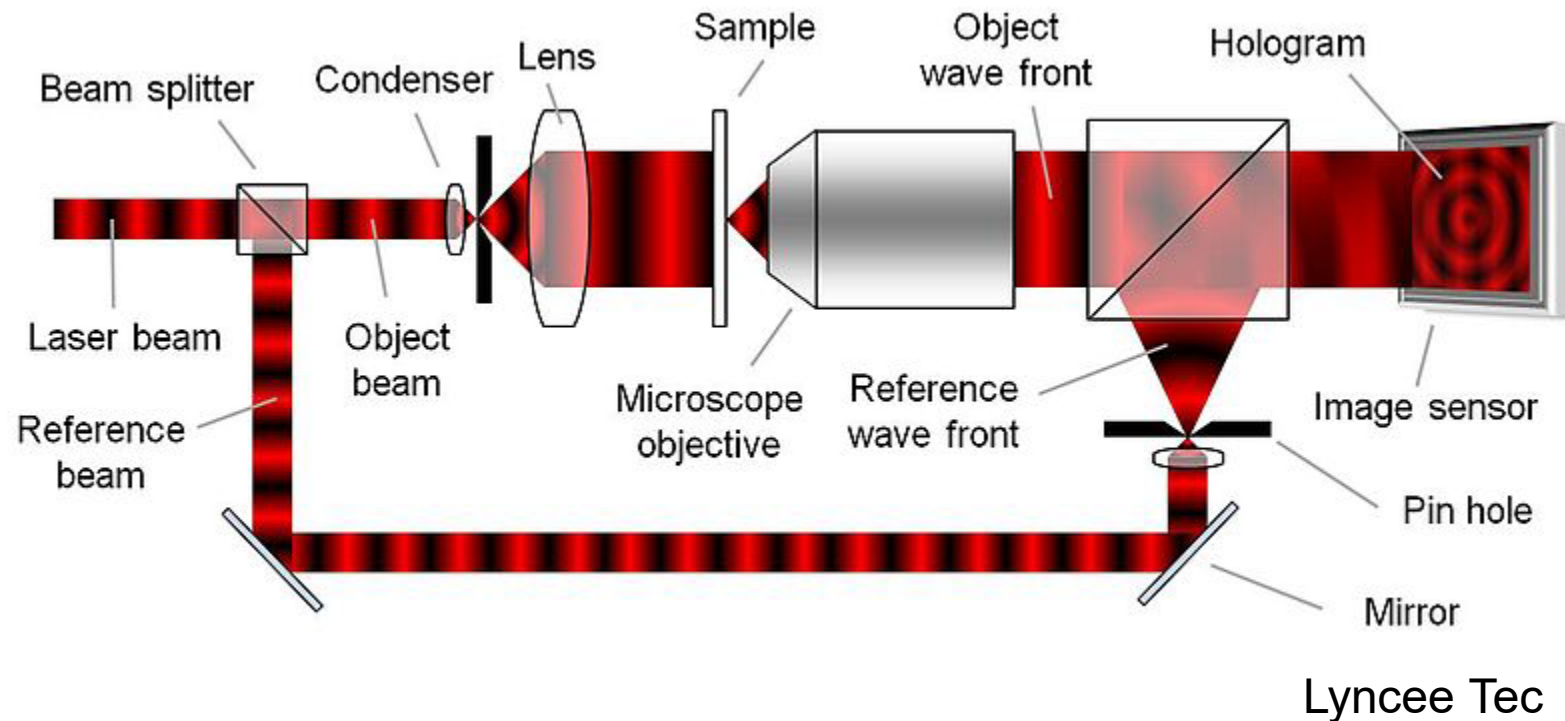


Texas Instruments



Microscopie holographique digitale

- On enregistre un hologramme de l'échantillon
- On peut ensuite reconstruire l'objet en 3D
- Lyncéetec, issue de la microtechnique EPFL, leader mondial dans la microscopie holographique digitale



Microscopie holographique digitale

- Cellules vivantes:

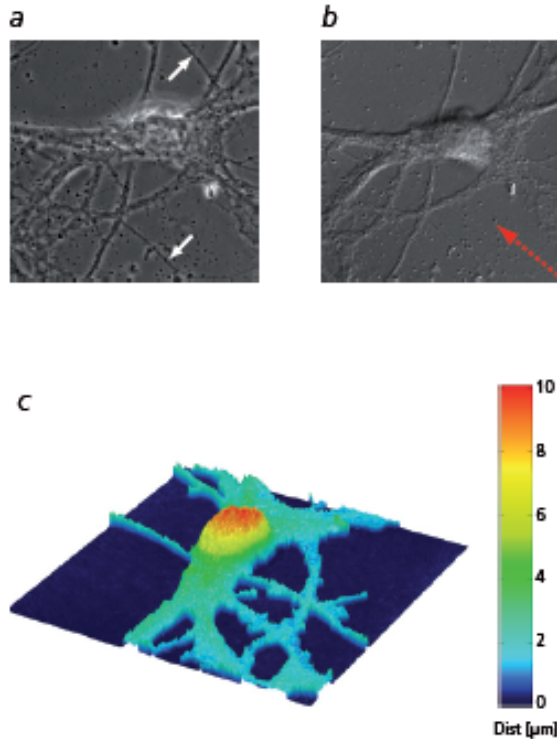


Figure 1: Images of a living mouse cortical neuron in culture: a) dark PhC image; b) DIC image; c) perspective image in false colors of the phase distribution obtained with the DHM™ T1000.

- Micro-lentilles

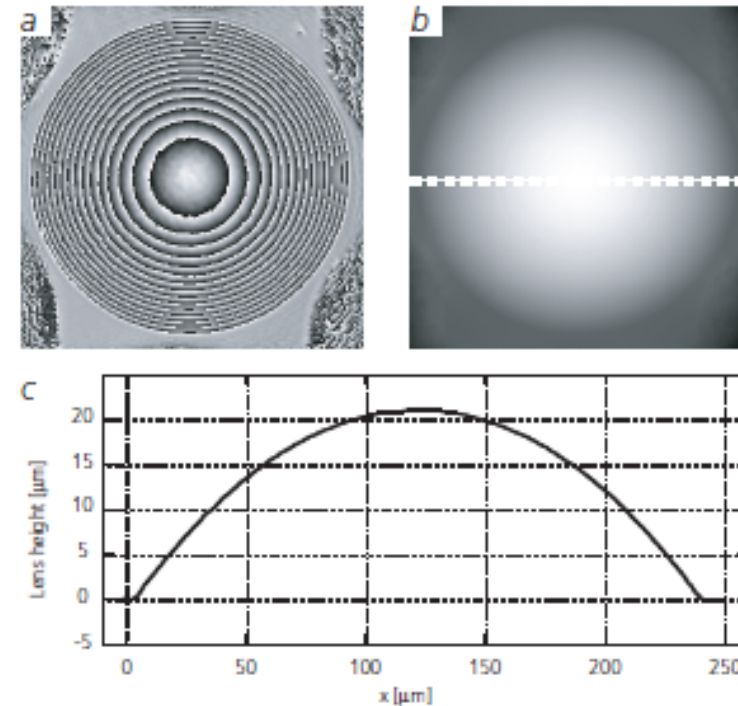


Figure 1: Phase images of a quartz refractive transmission lens (diameter $240\mu\text{m}$, maximal height $21.15\mu\text{m}$, measured ROC $351\mu\text{m}$) obtained with DHM™ T1000: (a) wrapped, (b) unwrapped and (c) height profile taken along the dashed line in (b).

Lyncee Tec

Microscopie holographique digitale

- Rugosité de surface (pour une sphère):

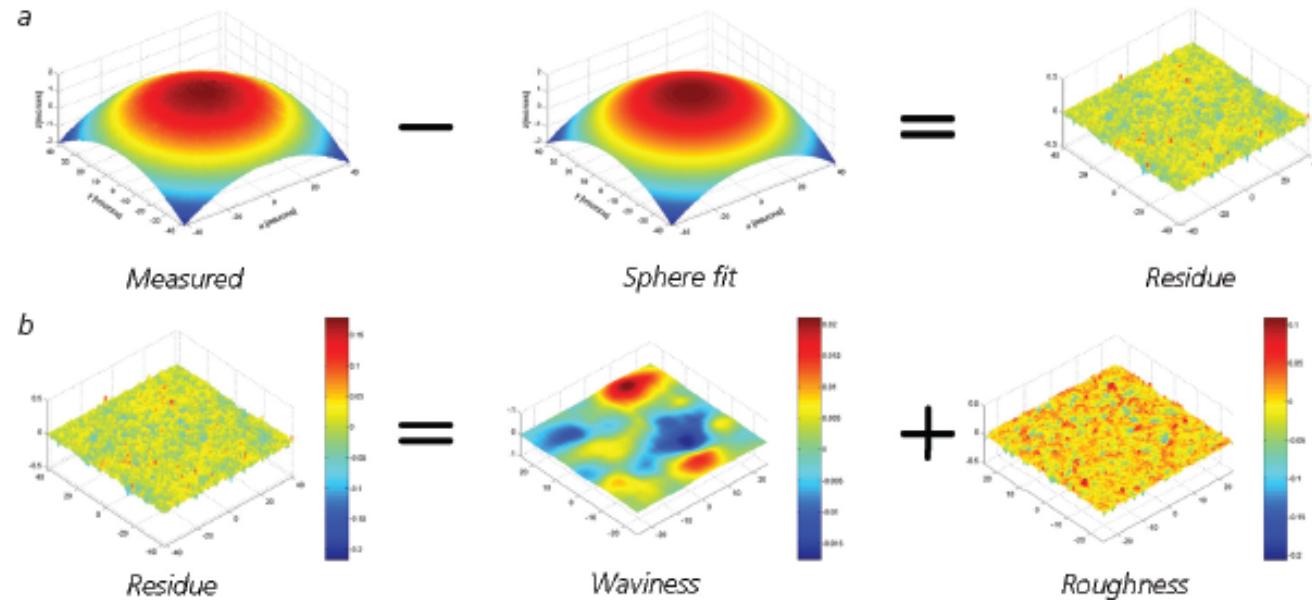


Figure 1: (a) Form factor removal principle: a spherical fit is subtracted to the measured surface to obtain the residual surface.

(b) Roughness surface determination: the residual surface is decomposed in two parts by frequency: the waviness is composed of the low frequencies and the roughness of the high ones.

Mémoire holographique

- Permet de stocker une grande quantité d'information en utilisant le volume du matériau de stockage et en enregistrant différents objets avec différentes ondes de référence, voire différentes longueurs d'onde
- En principe, on peut stocker 1 bit par unité de volume λ^3
- Soit 500 MB par mm^3 , pour $\lambda=633 \text{ nm}$ (laser He-Ne)

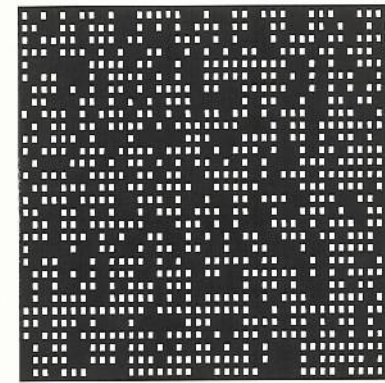
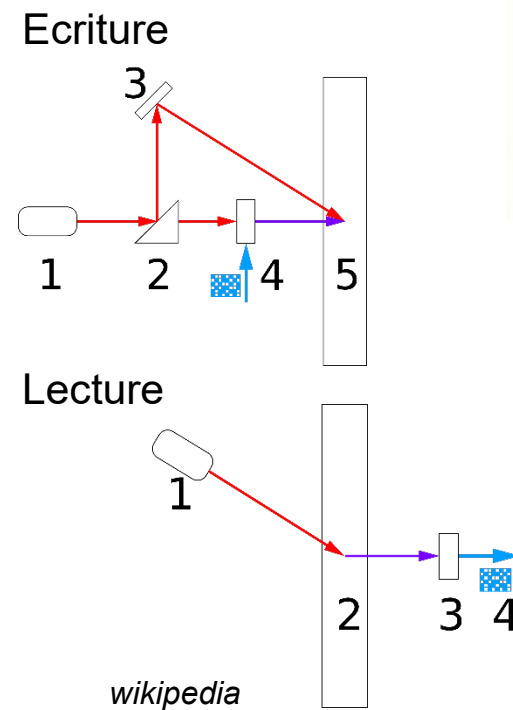
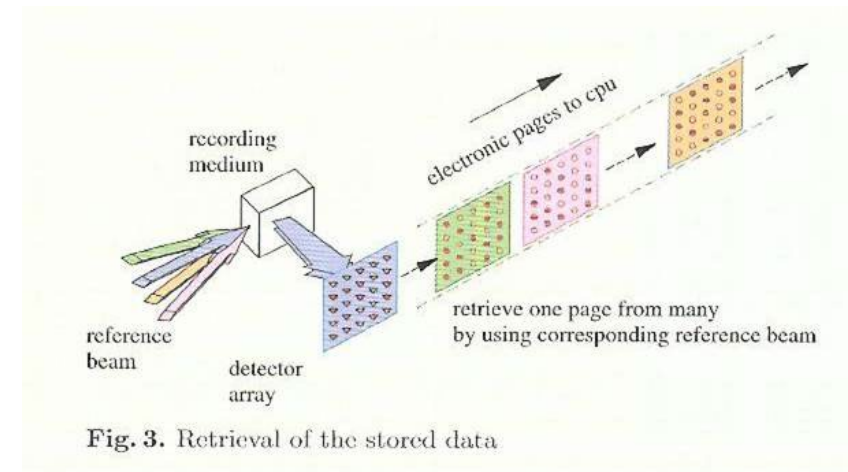
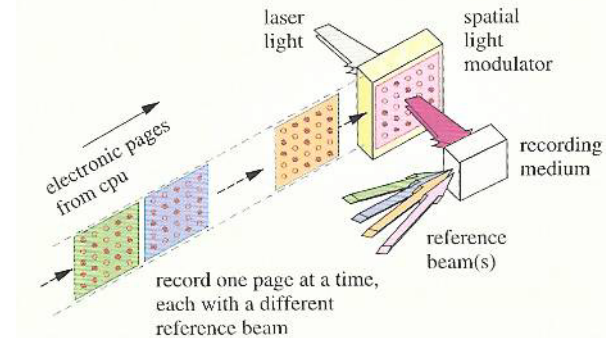
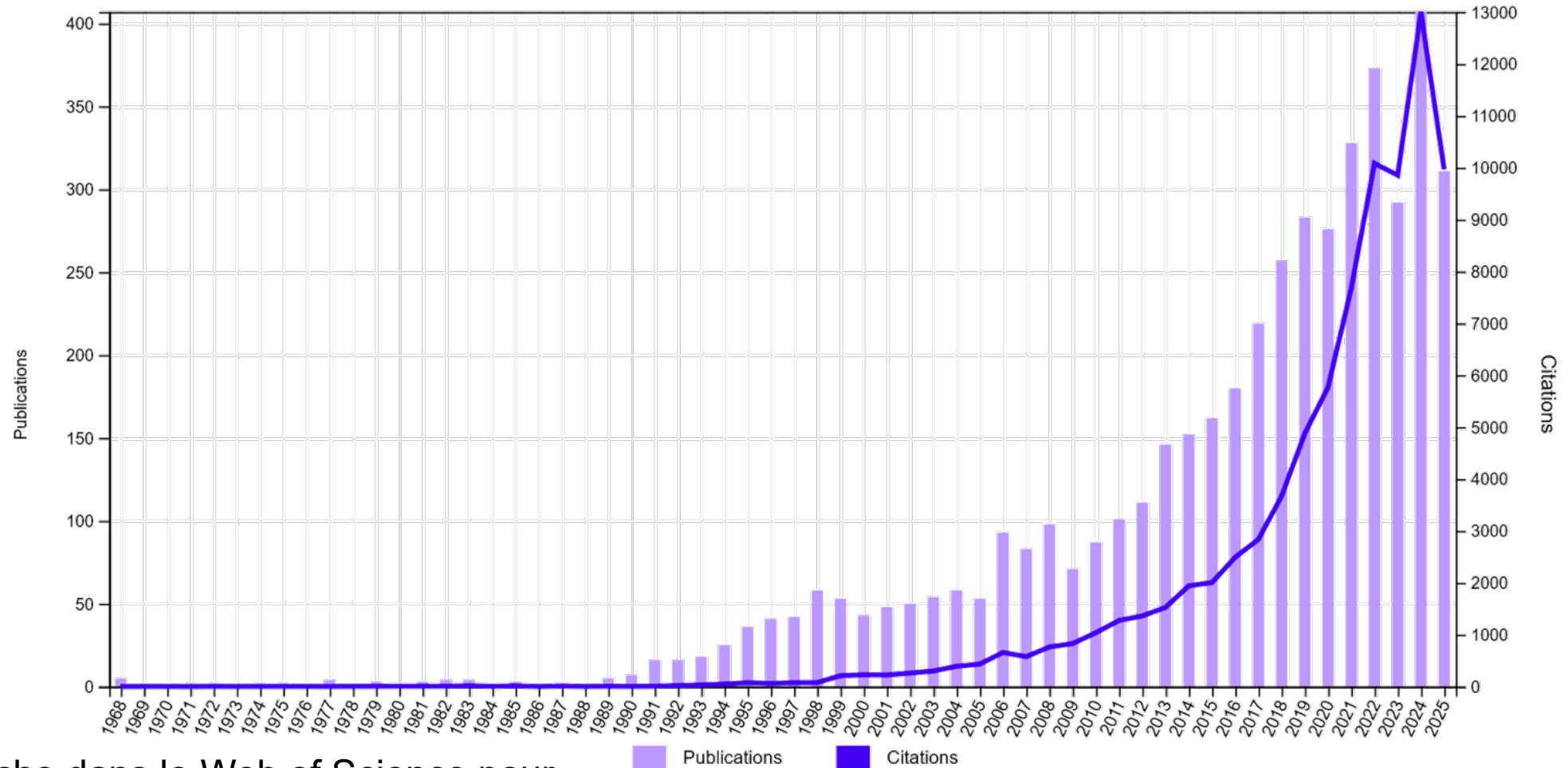


Fig. 1. A section of a page of binary data, representing what would appear on the spatial light modulator. A typical page would contain 1024×1024 bits, and the size of each bit cell would be 15–20 μm



Holographic displays

- Un sujet de recherche intense avec des applications en réalité augmentée et virtuelle



Recherche dans le Web of Science pour
“holographic display”, octobre 2024

Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective

CHENLIANG CHANG,¹ KISEUNG BANG,² GORDON WETZSTEIN,³ BYOUNGHO LEE,² AND LIANG GAO^{1,*}

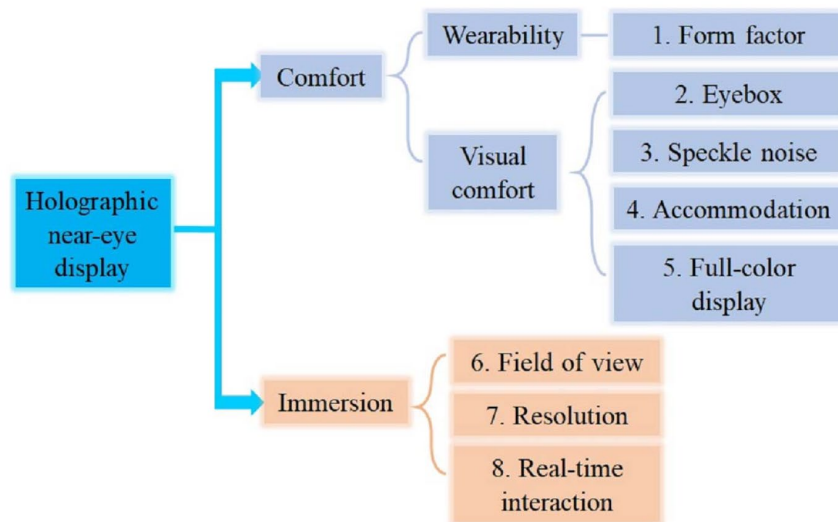


Fig. 1. Categorization of holographic near-eye displays from the human-centric perspective.

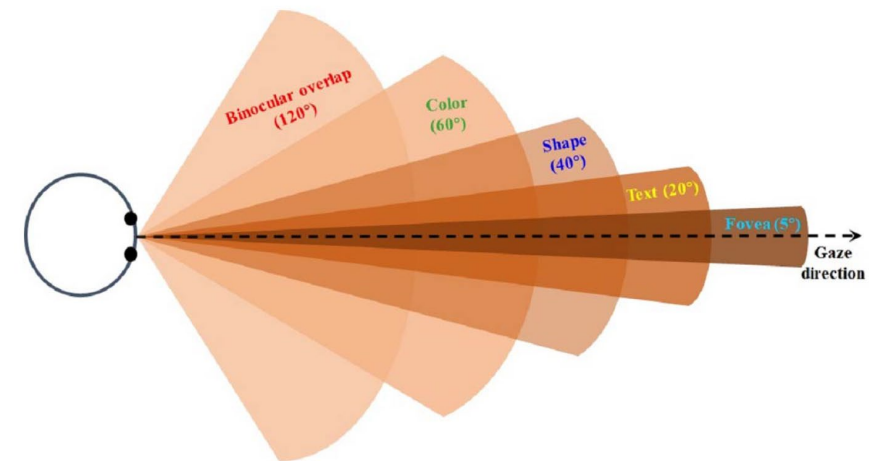
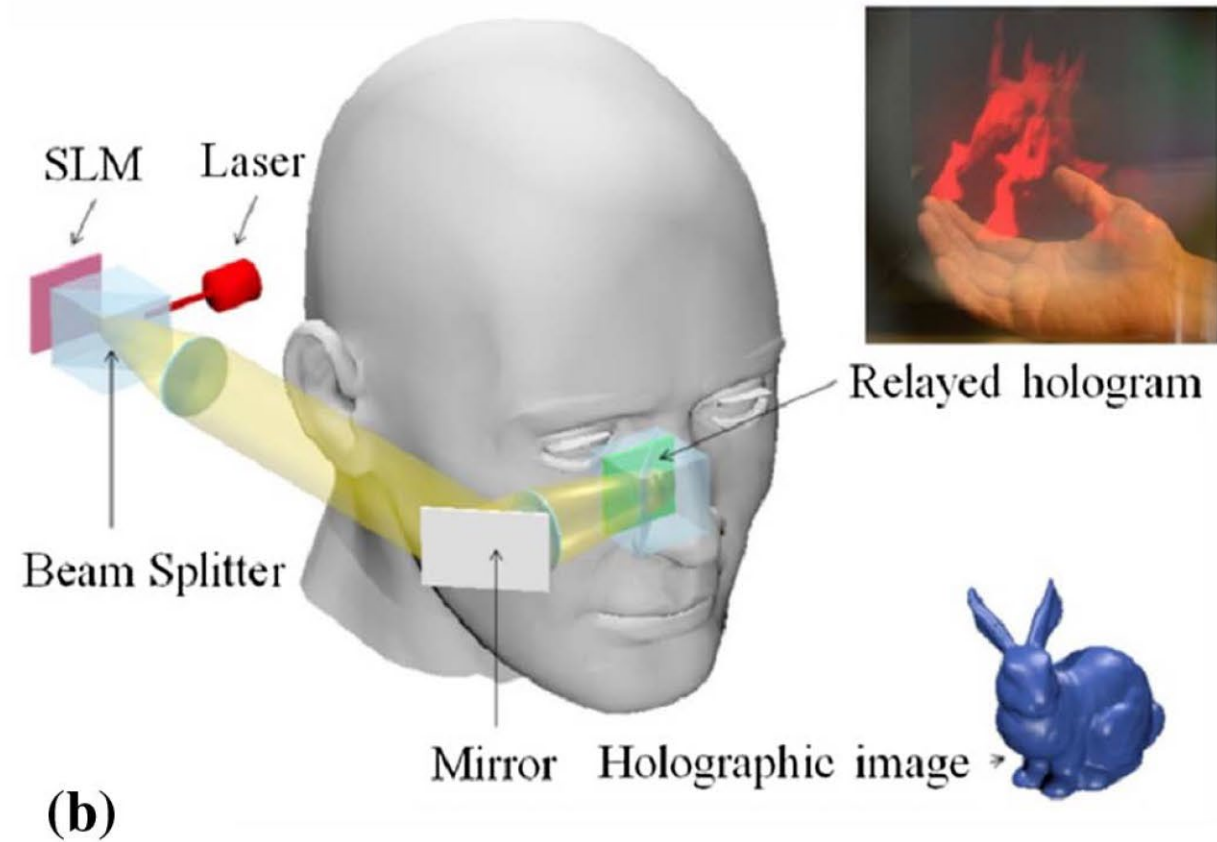
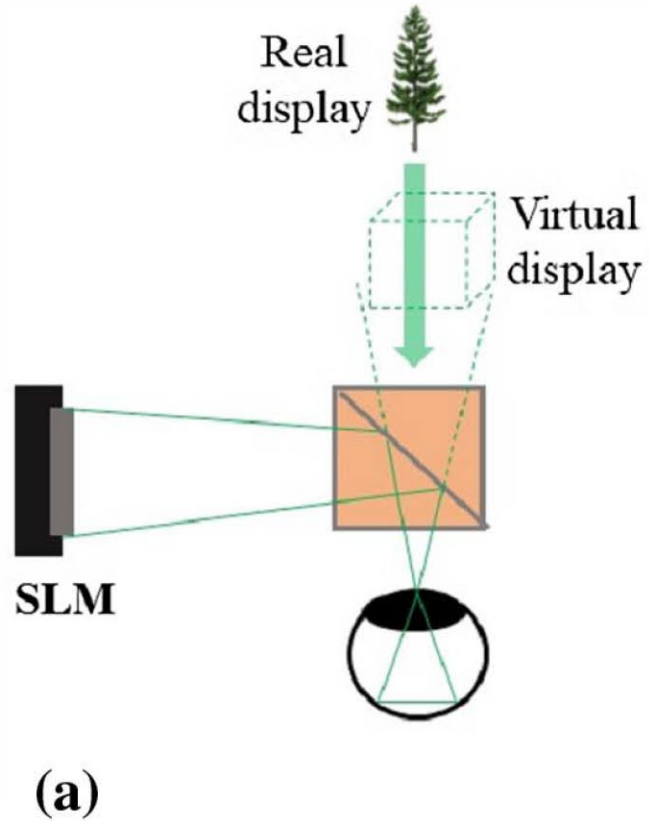


Fig. 2. Visual fields of the human eye.

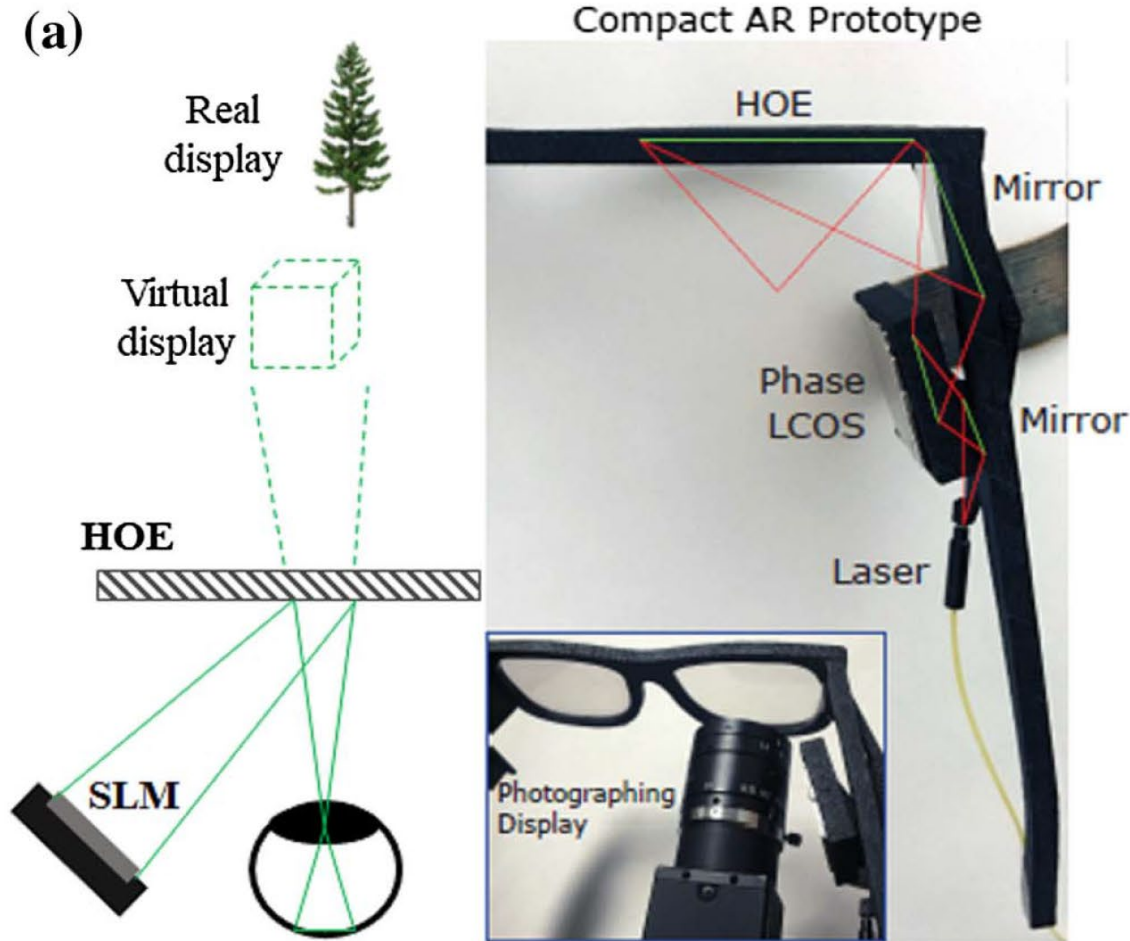
Holographic displays

- Deux composants principaux: spatial light modulator (SLM) et beam splitter

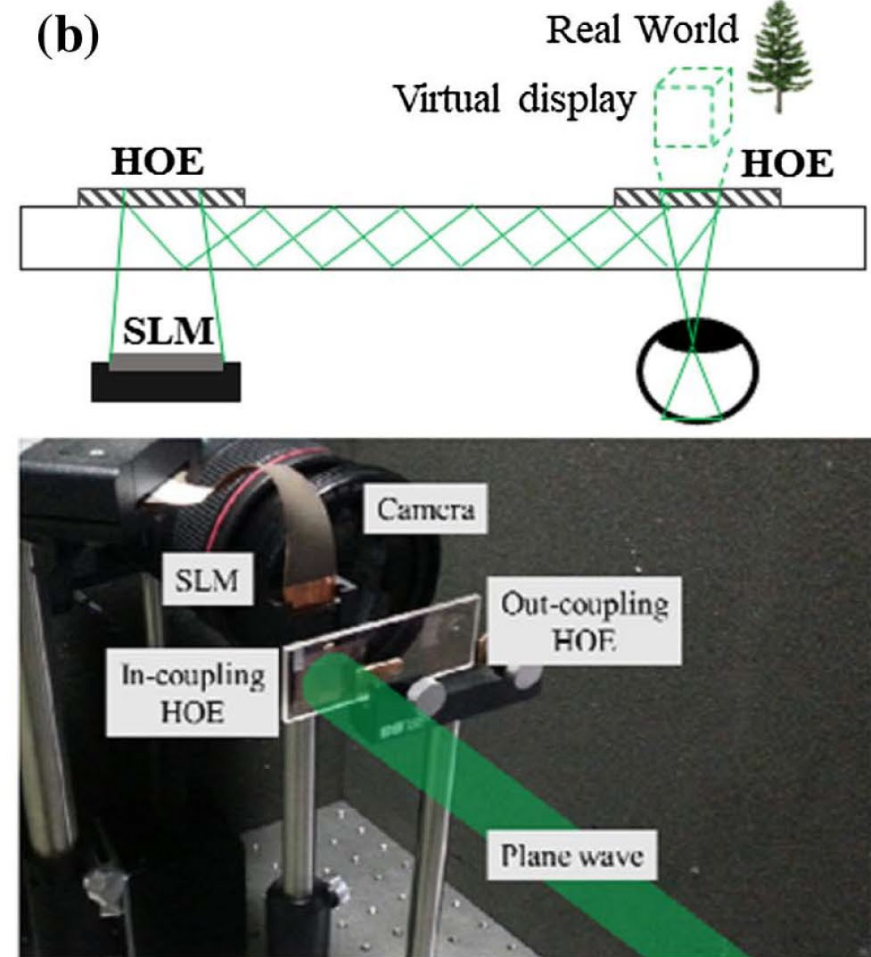


Holographic displays

- Deux composants principaux: spatial light modulator (SLM) et beam splitter



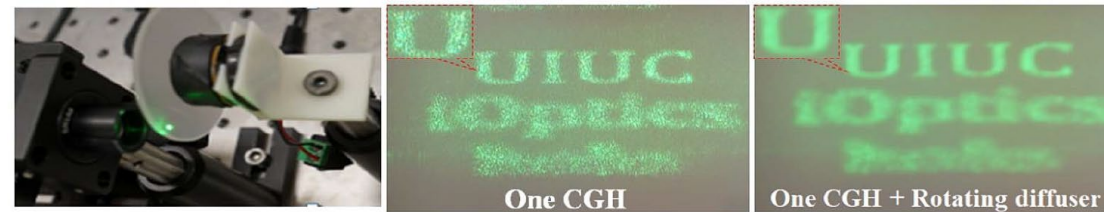
Off-axis HOE see-through combiner



Waveguide HOE see-through combiner

Holographic displays

- La cohérence du laser produit du speckle qui détériore l'image et doit être éliminé



CGH: computer generated hologram

