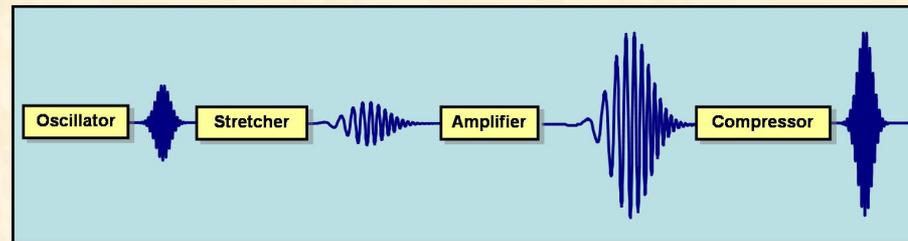


Introduction aux LASERs

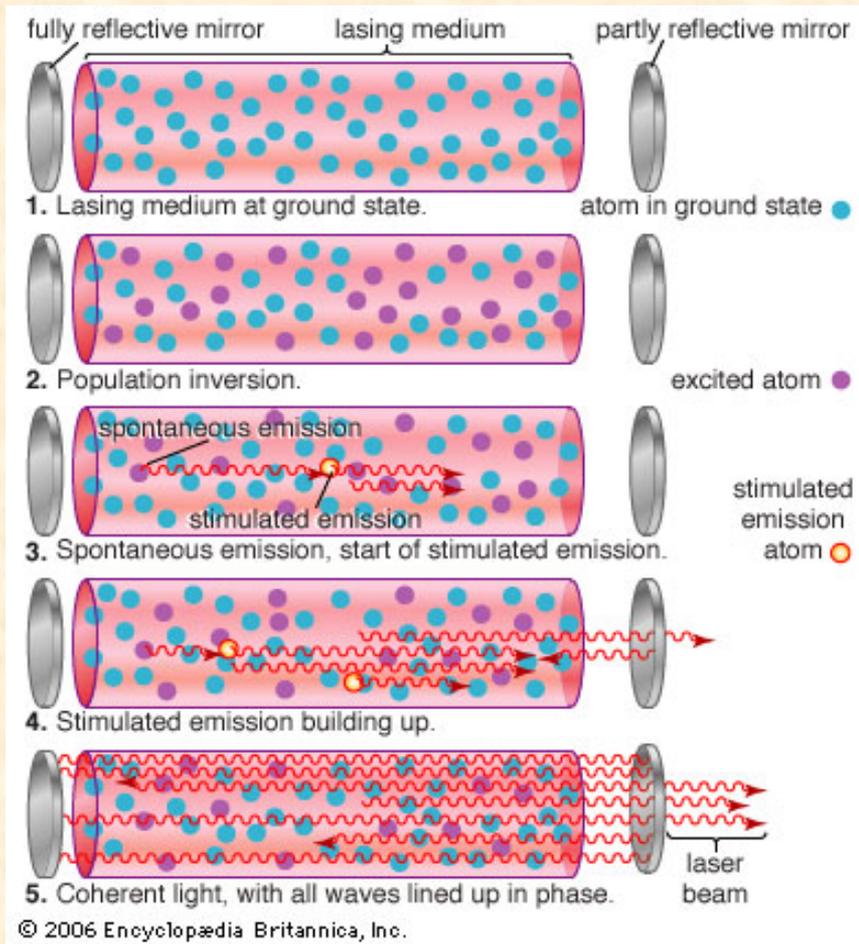
II. LASERs avancés



Nicolas Delerue

LAL (CNRS and Université de Paris-Sud)

Rappel: fonctionnement d'un laser



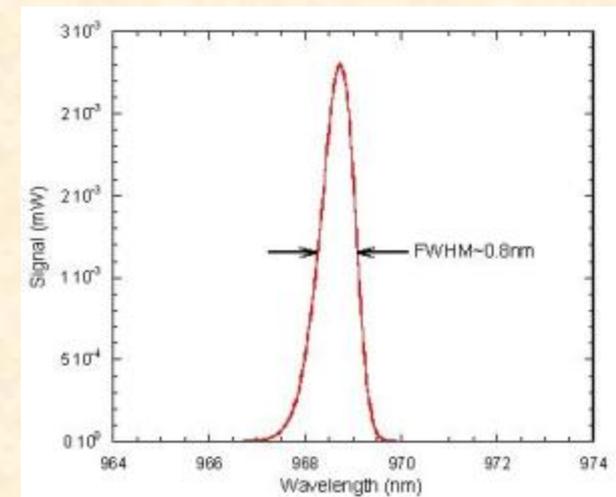
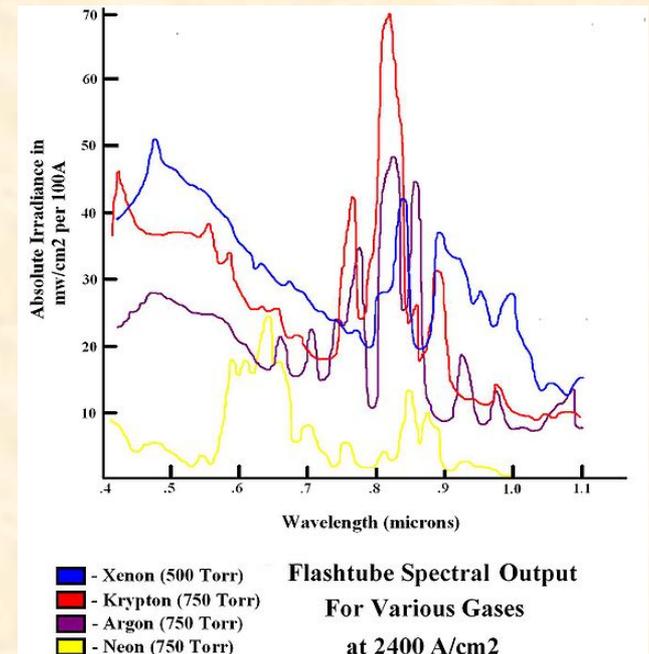
- Une source laser est formée d'un milieu amplificateur entre deux miroirs.
- Le milieu amplificateur doit être pompé pour créer une inversion de population.
- Cette inversion de population permet des émissions stimulées.
- Si les conditions sont réunies ces émissions stimulées entraînent une réaction en chaîne et un faisceau laser sort de la cavité.

Notions de ce cours

- Pompage et diodes lasers
- Pointeurs lasers
- Lasers pulsés
- Ordres de grandeur
- Modes d'un laser
- Changement de longueur d'onde
- Lasers de puissance

Méthodes de pompage

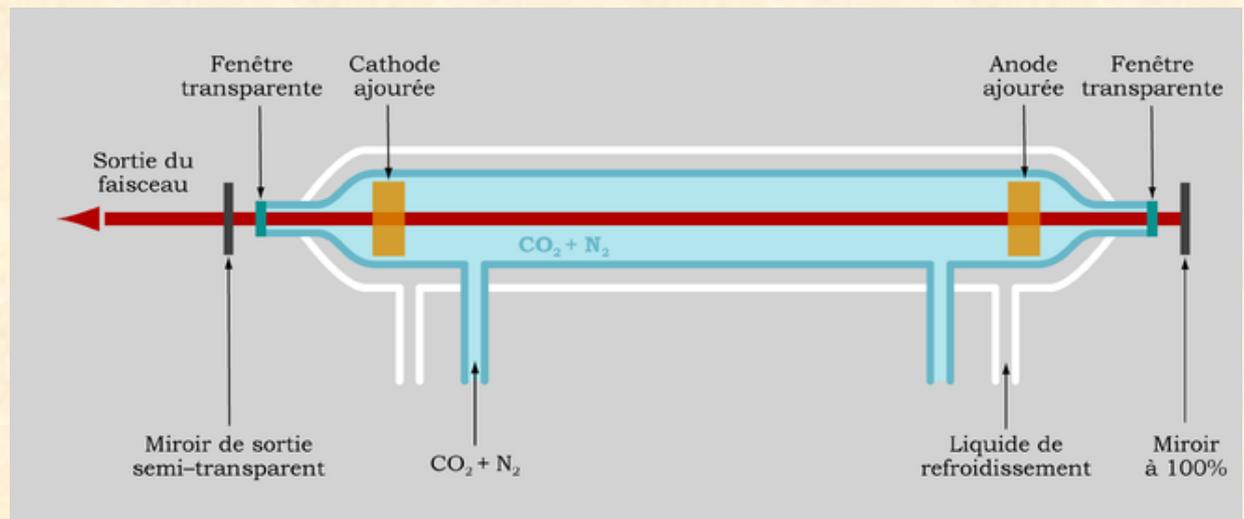
- Comme discuté précédemment, le milieu amplificateur d'un laser doit être « pompé ».
- Le laser à rubis était pompé par des lampes à décharges émettant des flash.
 - Cette méthode est très inefficace car le flash émet dans toutes les directions et sur une large bande spectrale => fortes pertes.
 - Encore utilisés dans certains lasers surtout à haute puissance et faible taux de répétition.
- Des diodes lasers permettent d'avoir une émission beaucoup plus monochromatique et monodirectionnelle.
- Dans certains cas un laser peut-être utilisé pour en pomper un autre (par exemple des lasers Nd:YAG sont utilisés pour pomper des Ti:Saphire).



<http://www.princetonoptronics.com/>

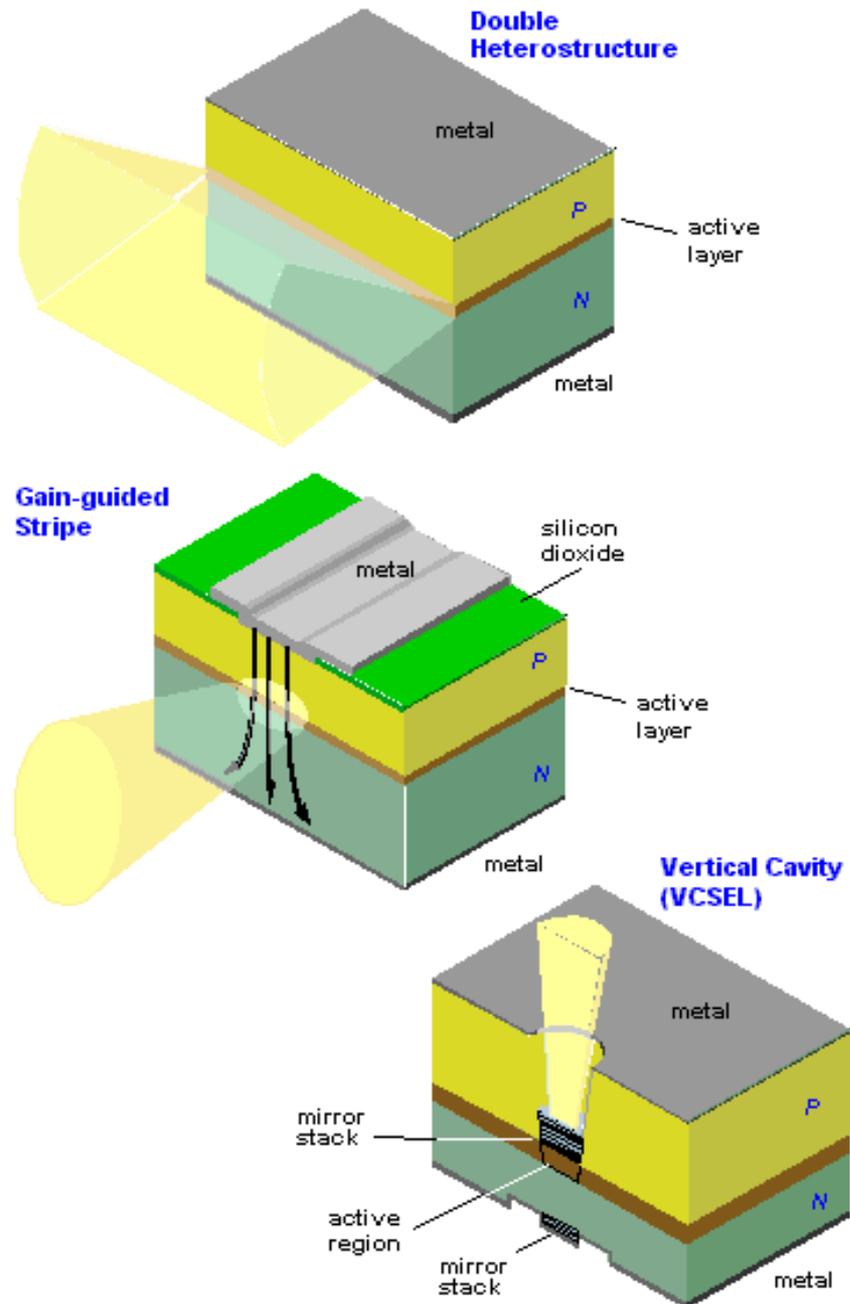
Méthodes de pompage plus exotiques

- Bien que la plupart des lasers utilisent un pompage optique, il existe d'autres méthodes:
 - Les lasers à gaz (CO_2) peuvent être pompés par un flux de gaz subissant un changement de température pour créer l'inversion de population.
 - Des décharges électriques sont utilisées dans d'autres lasers à gaz.
 - Un courant électrique est utilisé pour pomper les diodes laser.
 - Une réaction chimique peut aussi être la source de l'inversion de population.



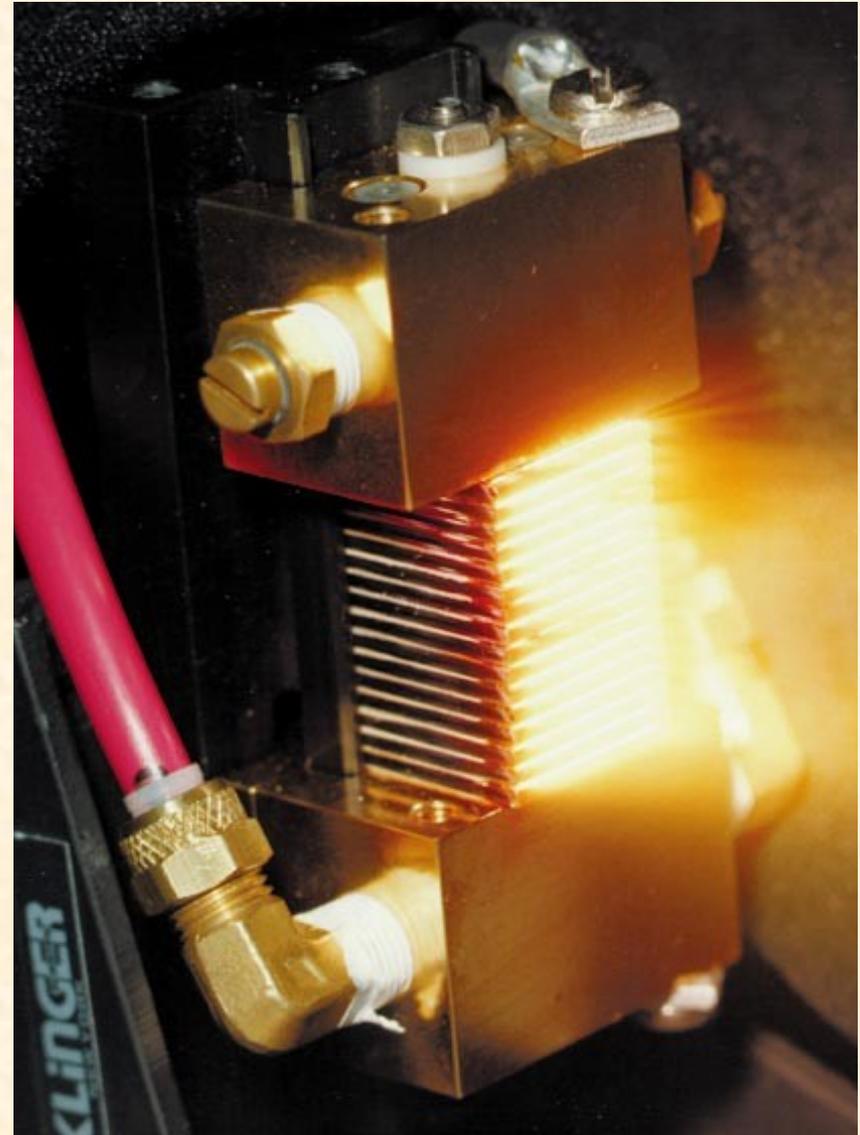
Diodes laser

- Les diodes lasers sont un type particulier de lasers.
- Ici le milieu amplificateur est un semiconducteur.
- Un courant y circulant peut y former des paires electron-trou.
- Lorsqu'une paire se recombine elle émet un photon qui peut à son tour stimuler l'émission d'autres photons.



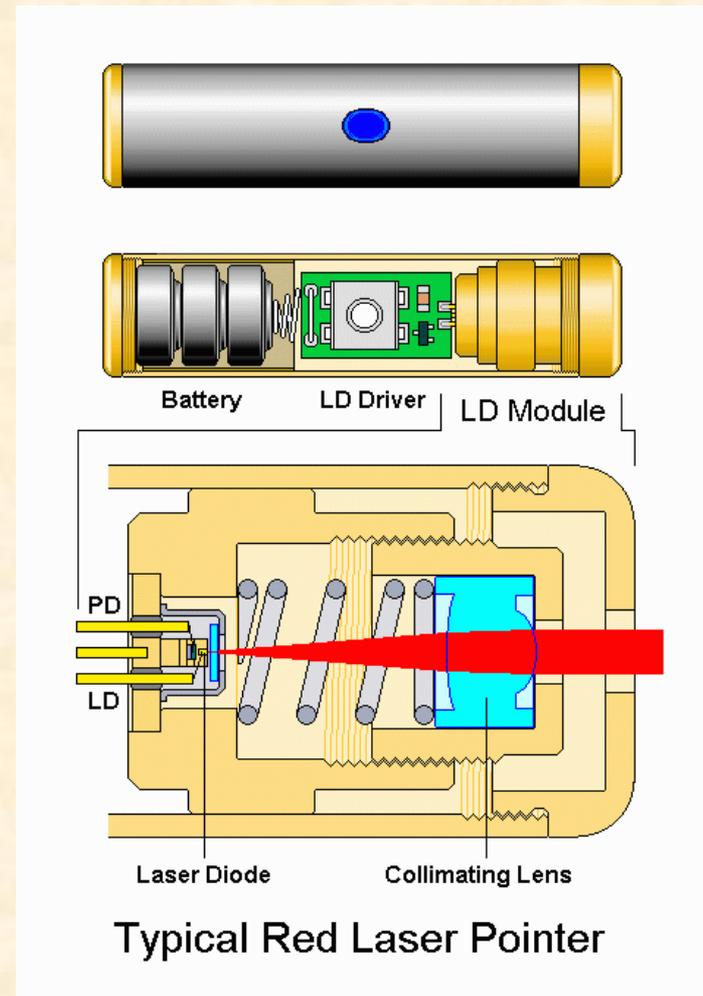
Diodes laser (2)

- A cause de la diffraction dans le semi-conducteur les diodes laser produisent un faisceau très divergent.
- Par contre elles offrent un très bon rendement (plus de 50%).
- Les diodes laser sont actuellement le moyen le plus efficace de produire les photons requis pour pomper le milieu amplificateur d'un autre laser.
- De nombreuses longueurs d'onde sont disponibles de 375nm à plus de 2500nm...



Exemple: pointeur laser

- Il existe de nombreux types de pointeurs lasers.
- Les pointeurs rouges sont les plus simple.
- Ils contiennent simplement une diode laser émettant à 650nm ou 670nm.
- Une lentille est utilisée pour focaliser le faisceau de la diode.
- Plus tard nous verrons comment fonctionne un pointeur vert.



Laser pulsé

- Une fois le régime d'équilibre atteint (en quelques ms) la cavité dont nous avons discuté hier émet un faisceau continu.
- Il est cependant possible de la modifier pour produire un faisceau pulsé.
- Différentes techniques peuvent être utilisées pour cela:
 - Pompage pulsé (simple mais peu précis)
 - Q-switch
 - Blocage de mode (*mode-lock*)

Laser à Q-switch

Impulsions de quelques ns

- Dans un laser à Q-switch les pertes dans la cavités sont modulées.
- Lorsque les pertes sont faibles une impulsion se forme et une émission a lieu.
- Lorsque les pertes sont fortes, le seuil d'émission n'est plus atteint et l'émission cesse.
- Il existe deux type de techniques de Q-switch:
 - active: un élément bloque l'accumulation de puissance dans la cavité.
 - passive: un composant appelé « absorbeur saturable » absorbe plus d'énergie à basse puissance que à haute puissance, entraînant la formation d'impulsions courtes.

Q-switch actif

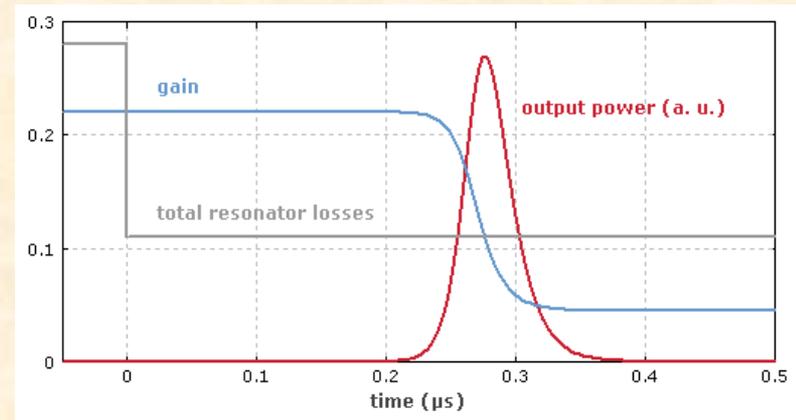
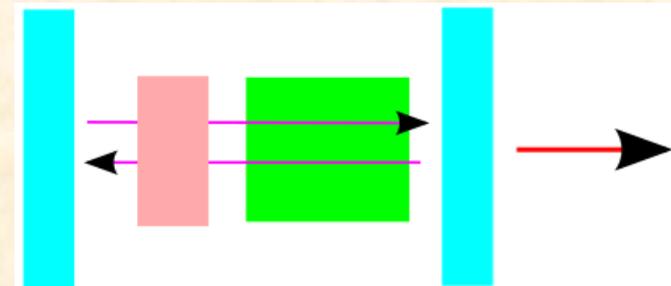
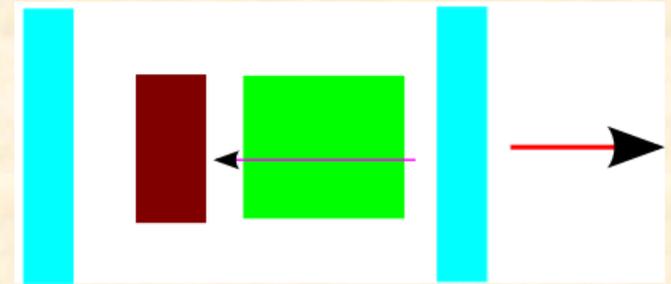
- Dans le Q-switch actif un « interrupteur », par exemple une cellule de Pockels, est inséré dans la cavité.
- Quand la cellule est fermée elle bloque la lumière et il n'y a pas d'émission.

$$2\alpha_1 L < \delta_{loss} + t_2$$

- Quand la cellule s'ouvre, elle laisse passer la lumière permettant d'atteindre les conditions nécessaires à l'émission.

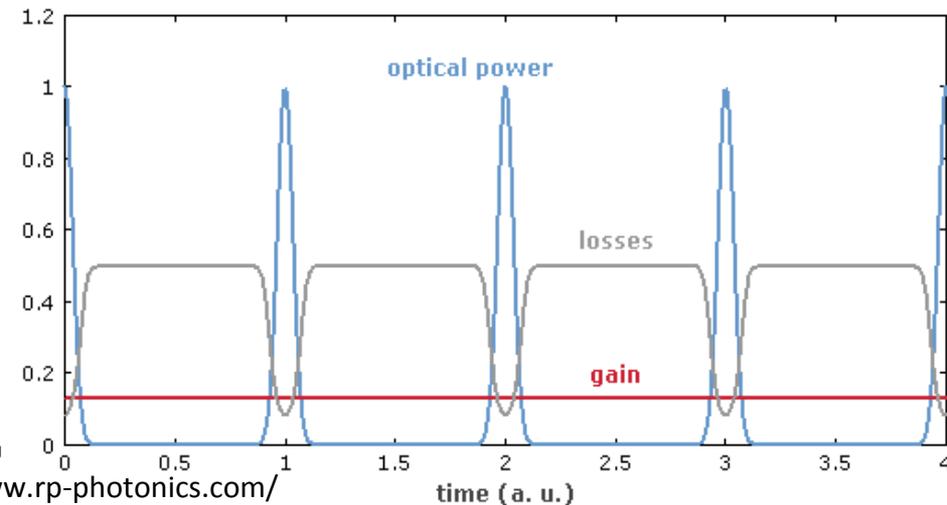
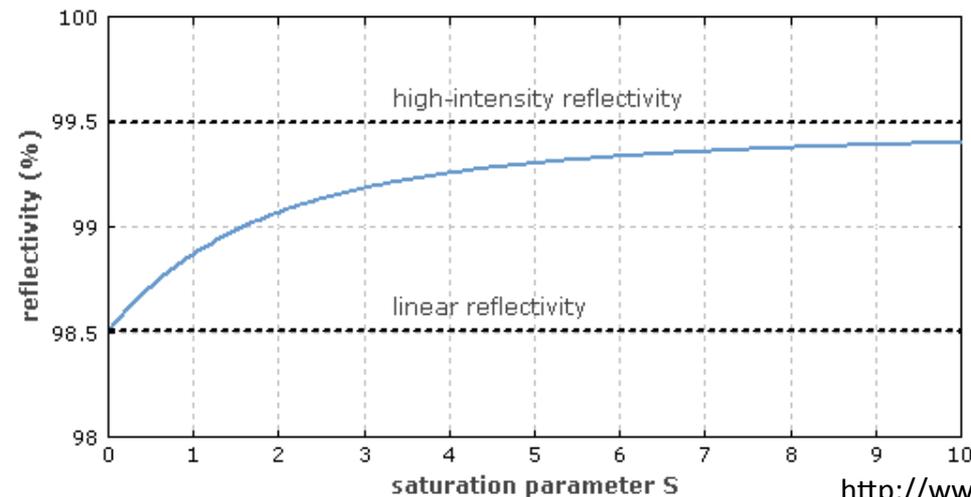
$$2\alpha_1 L \simeq \delta_{loss} + t_2$$

- Dans certains cas l'émission consomme toute l'énergie du milieu amplificateur ce qui limite la durée de l'impulsion.



Absorbeur saturable

- Un absorbeur saturable est un miroir dont la réflectivité varie en fonction de l'intensité de l'impulsion incidente.
- Cela entraîne un rétrécissement de l'impulsion et empêche la formation d'autres impulsions.
- Il existe de nombreux types d'absorbeurs saturables permettant d'atteindre des longueurs d'impulsions différentes.



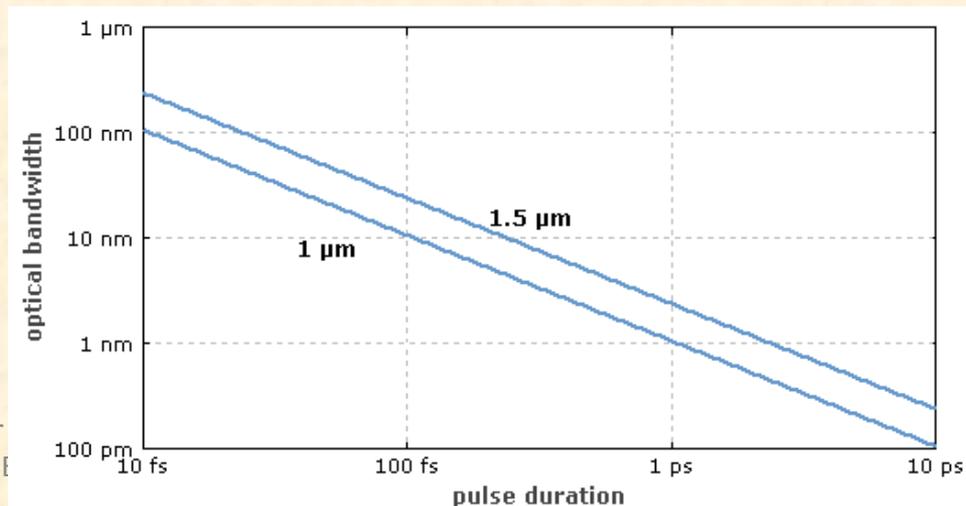
Blocage de mode:

Produit temps – largeur spectrale

- En mécanique quantique, la relation d'incertitude d'Heisenberg indique qu'il n'est pas possible de connaître simultanément la position et l'énergie d'une particule:

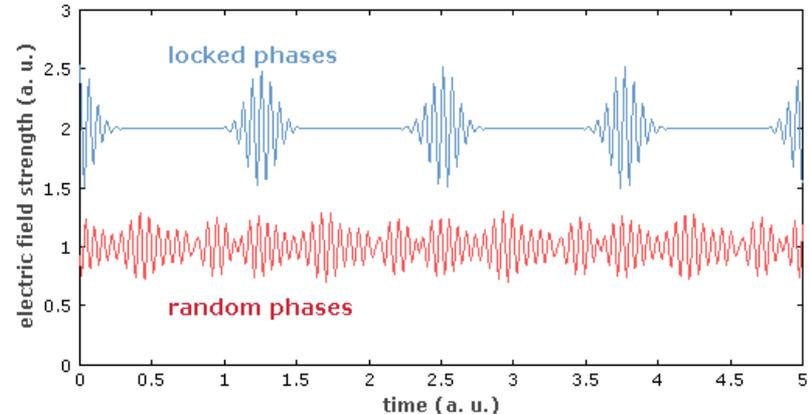
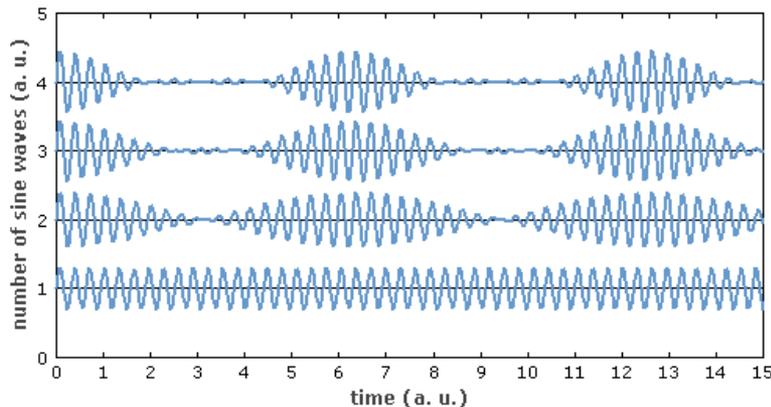
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Appliquée aux impulsions lasers, cette relation limite le produit entre la durée d'une impulsion et sa largeur spectrale.
- Une impulsion laser de moins d'une picoseconde doit donc avoir une largeur spectrale d'au moins 1nm.



Blocage de mode: Principe

- Le blocage de mode consiste à forcer tous les modes du laser à avoir la même phase de manière à ce qu'ils s'ajoutent à un moment donné pour former des impulsions très courtes.
- Avec cette technique il est possible d'obtenir des impulsions de quelques femtosecondes.
- Le blocage de mode peut-être actif (avec un modulateur) ou passif (avec un absorbeur saturable).



Puissance, Durée, Energie

- La production d'impulsions ultra-courtes permet d'atteindre des puissances énormes.
- Une puissance crête de 1MW pour un laser picoseconde n'a rien d'exceptionnel.

$$\text{Puissance} = \frac{\text{Energie}}{\text{Durée}}$$

$$1\text{MW} \times 1 \text{ ps} = 10^6 \text{W} \times 10^{-12} \text{s} = 10^{-6} \text{J}$$

- Les lasers les plus puissant atteignent le PetaWatt (10^{15}W) mais seulement pour quelques femtosecondes (10^{-15}s).

Question:

Lequel de ces lasers délivre la plus grande puissance moyenne?

- Attention: Il ne faut pas confondre puissance crête et puissance moyenne.
- A) Un laser Ti:Saphire rouge délivrant des impulsions de 10fs, 1TW à 0.1 Hz
- B) Un pointeur laser vert de 1mW continu
- C) Un laser Nd:YAG infra-rouge (1064nm) délivrant des impulsions de 1ps, 1 GW à 5 Hz

Indice:

Lequel de ces lasers délivre la plus grande puissance moyenne?

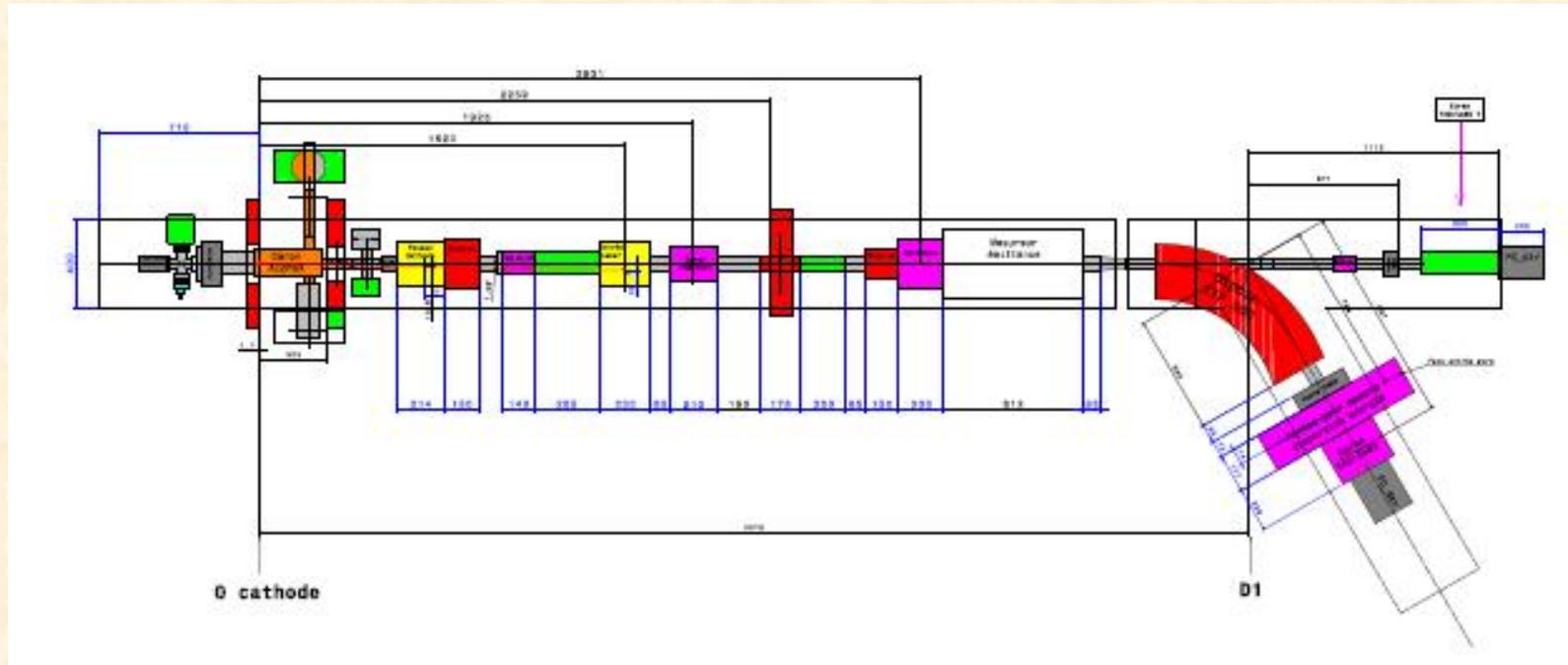
- Attention: Il ne faut pas confondre puissance crête et puissance moyenne.
- A) Un laser Ti:Saphire rouge délivrant des impulsions de 10fs (10×10^{-15} s), 1TW (10^{12}) à 0.1Hz (10^{-1})
- B) Un pointeur laser vert de 1mW (10^{-3}) continu
- C) Un laser Nd:YAG (1064nm) délivrant des impulsions de 1ps (10^{-12}), 1 GW (10^9) à 5 Hz

Réponse:

(c) Le Nd:YAG!

- Attention: Il ne faut pas confondre puissance crête et puissance moyenne.
- A) Un laser Ti:Saphire rouge délivrant des impulsions de 10fs ($10 \cdot 10^{-15}$ s), 1TW (10^{12}) à 0.1Hz (10^{-1})
 $\Rightarrow 10 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{12} \cdot 10^{-1} = 10^{-3}$ W
- B) Un pointeur laser vert de 1mW (10^{-3}) continu
 $\Rightarrow 10^{-3}$ W
- C) Un laser Nd:YAG (1064nm) délivrant des impulsions de 1ps (10^{-12}), 1 GW (10^9) à 5 Hz
 $\Rightarrow 10^{-12} \cdot 10^9 \cdot 5 = 5 \cdot 10^{-3}$ W
- Note: La longueur d'onde n'a (presque) rien à voir avec la puissance délivrée.

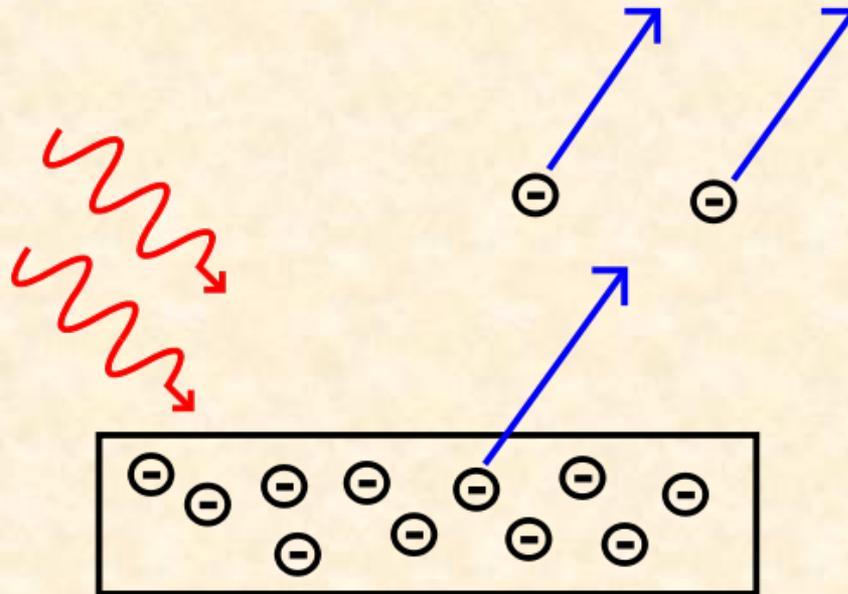
Application: Les photo-injecteurs



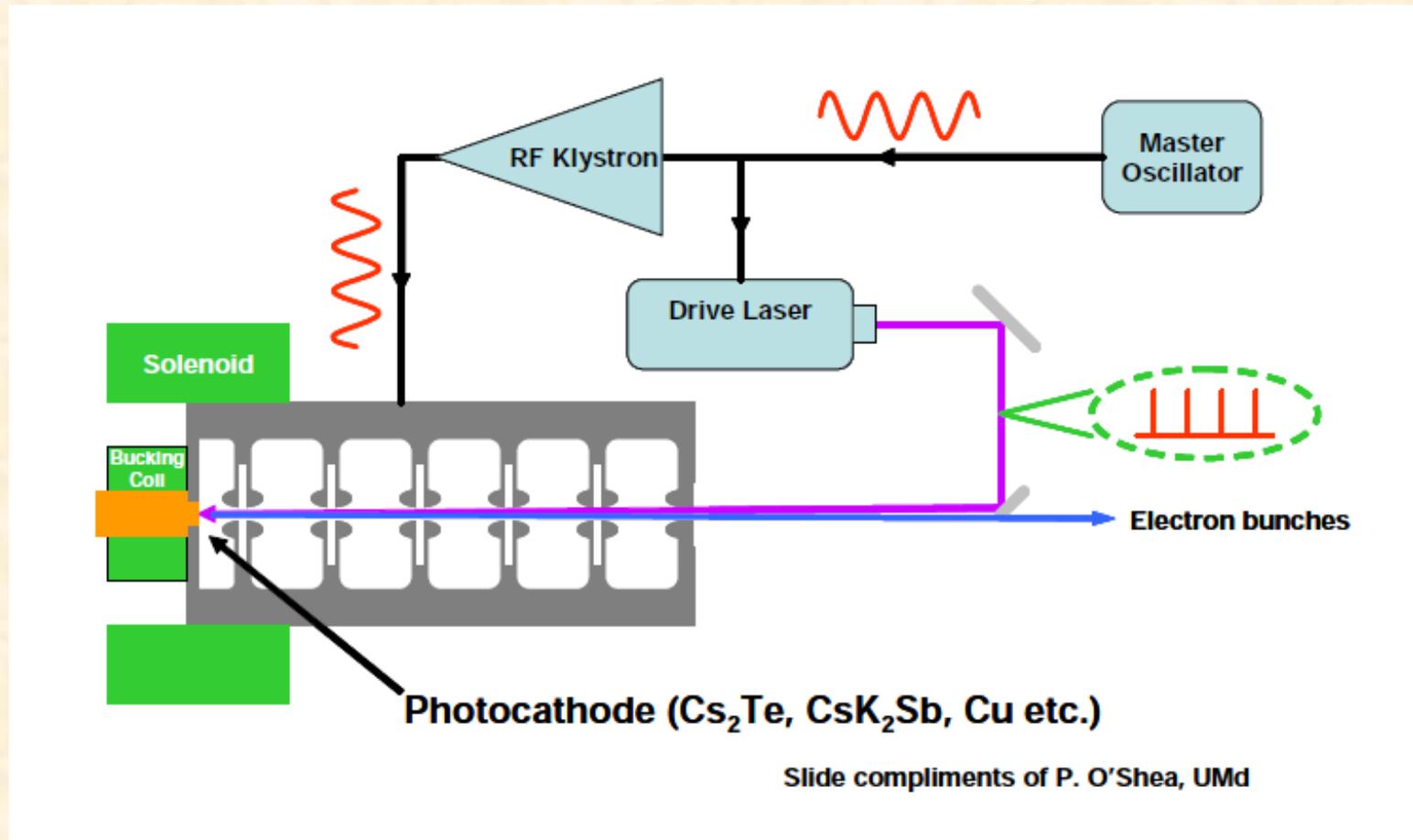
- PHIL est un photo-injecteur HF, c'est à dire une source d'électrons utilisée pour de la R&D au LAL.

L'effet photoélectrique

- Des photons UV incident sur un morceau de métal peuvent arracher des électrons.
- Cela s'appelle l'effet photoélectrique (expliqué par Einstein en 1905).
- Einstein a reçu le prix Nobel en 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique.



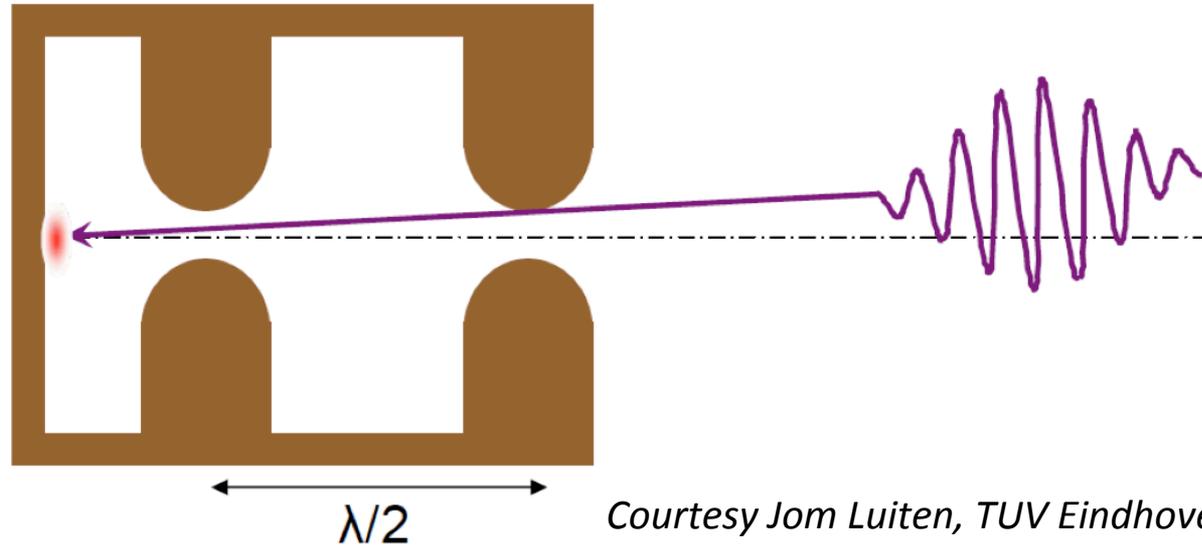
Principe d'un photo-injecteur



Dans un photo-injecteur un laser est utilisé pour « arracher » des électrons d'une cathode...

Photo-injecteur (2)

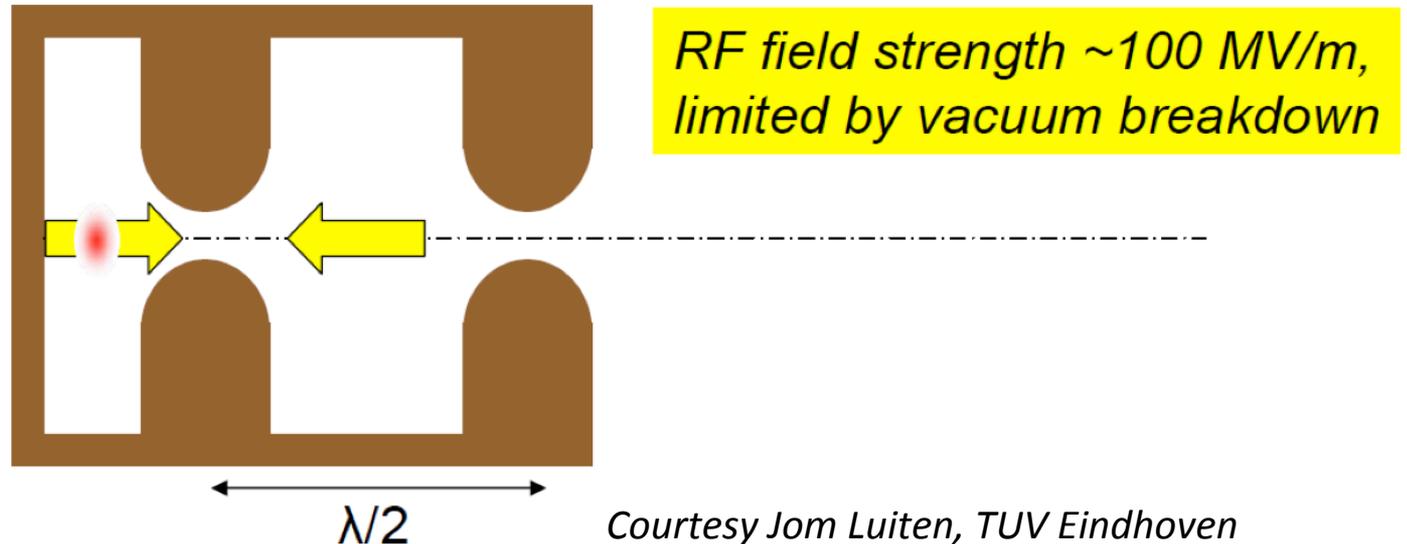
Pulsed laser photoemission...



- Les électrons sont arrachés directement par l'impulsions laser, grâce à l'effet photo-électrique.

Photo-injecteur (3)

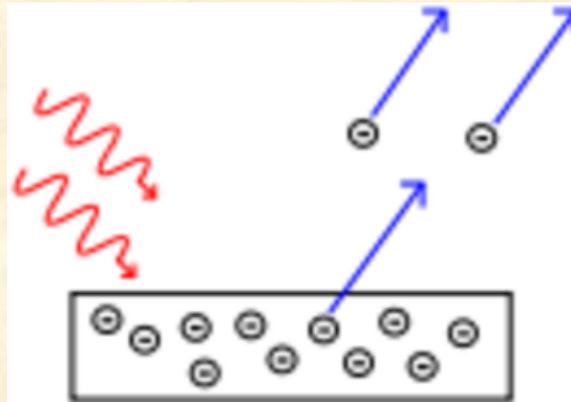
...and RF acceleration.



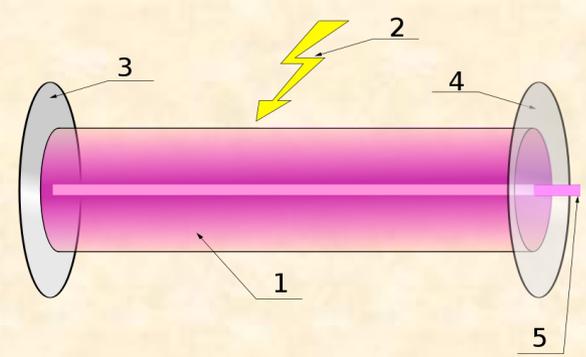
- Les électrons arrachés sont ensuite accélérés par une structure accélératrice normale.
- La longueur du paquet d'électrons produit est donc directement proportionnelle à la longueur de l'impulsion laser incidente (ou presque).

Photo-injecteurs (4)

- Pour produire des paquets d'électrons courts, il faut donc des lasers produisant des impulsions courtes (picoseconde ou femtoseconde).
- Dans le photo-injecteur les photons arrache des électrons avec une efficacité variant entre 10% et 50%.
- Pour produire 10^{10} électrons il faut donc 10^{11} photons, soit 100nJ pendant 1ps.
- Une puissance laser instantanée de 100kW à 1 MW est nécessaire pour produire ce paquet d'électrons.



Géométrie de la cavité



- L'émission spontanée qui déclenche les émissions stimulés dans la cavité ne se fait pas nécessairement selon l'axe optique.
- La géométrie de la cavité, et en particulier la disposition des miroirs doit être telle que les photons n'allant pas dans la bonne direction soient perdus (par exemple en étant absorbés par les parois).
- La géométrie doit aussi assurer que la pompe se propage bien dans tout le milieu amplificateur et que tout le milieu amplificateur contribue à l'émission.

Modes:

Sélection du mode principal

- Considérons l'énergie initiale dans la cavité comme une somme d'un certain nombre de mode orthogonaux:

$$E^{(0)}(x, y) = \sum_{nm} c_{nm} E_{nm}(x, y)$$

- Soit le mode 00 celui ayant le moins de pertes par aller retour. Après k aller-retours dans la cavité, ce mode va dominer les autres (ceci est aussi vrai pour les modes longitudinaux):

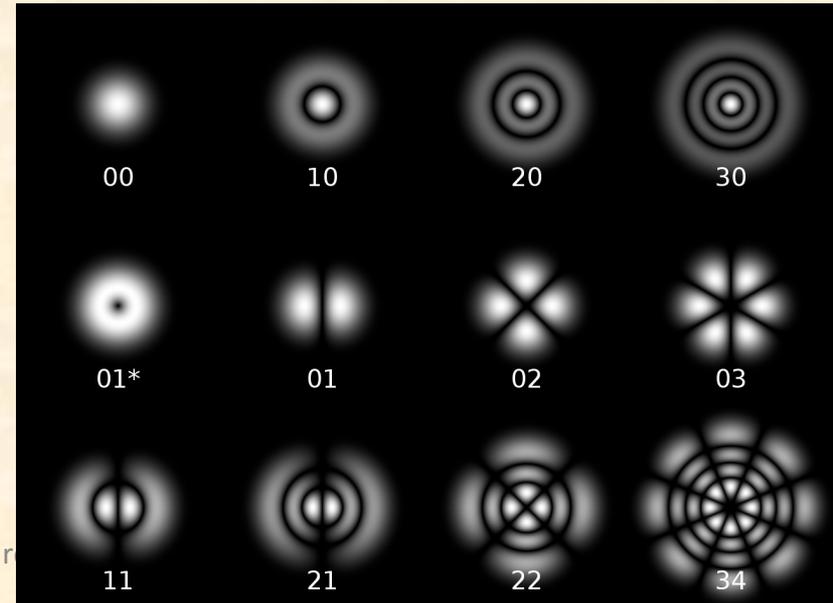
$$E^{(k)}(x, y) = \sum_{nm} \delta_{nm}^{-k} c_{nm} E_{nm}(x, y)$$

$$\frac{E_{nm}^{(k)}(x, y)}{E_{00}^{(k)}(x, y)} = \left(\frac{\delta_{00}}{\delta_{nm}} \right)^k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

Modes d'un laser

- Les modes transverses que peuvent prendre une onde électromagnétique (comme par exemple le faisceau d'un laser) sont décrits par les polynômes de Laguerre.
- Pour certaines applications il est possible de sélectionner un mode supérieur.

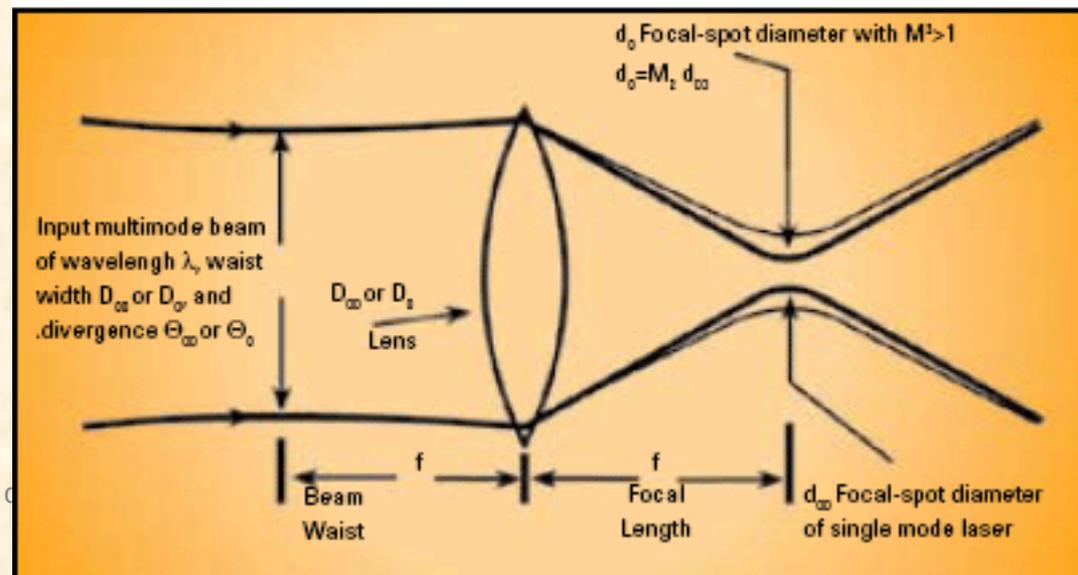
$$I_{\rho,\varphi} = I_0 \rho^l [L_p^l(\rho)]^2 \cos^2(l\varphi) e^{-\rho}$$



Qualité d'un laser: M^2

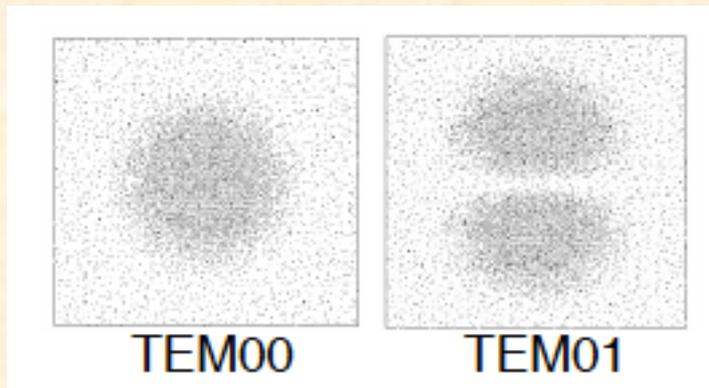
- Malgré leur atténuation certains modes supérieurs peuvent apparaître.
- La qualité d'un faisceaux laser est mesuré par la variable M^2 . Les modes supérieurs ayant une divergence plus grande, M^2 est basée sur une mesure de la divergence du faisceau.

$$M^2 = \frac{4\lambda f D_0}{d_0 \pi}$$

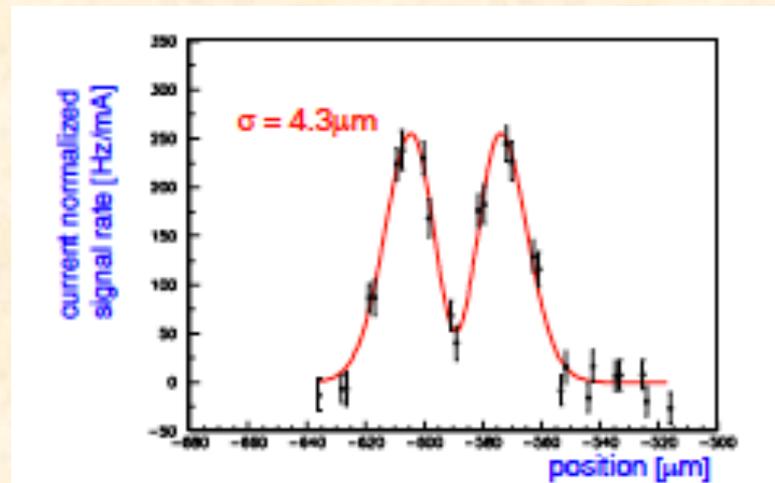


Application: Laser-wire TEM 01

- Pour améliorer la qualité de leur laser-wire un groupe de Japonais du KEK ont décidé d'utiliser le mode TEM01 au lieu du mode TEM00.
- Pour cela ils ont modifié leur cavité laser pour empêcher le mode TEM00 de se former et favoriser TEM01.
- Grâce à cela ils ont été capable d'observer des faisceaux plus petits.



T. Honda, PAC09, WEGRI03



Doublement de fréquence: *Second harmonic generation (SHG)*

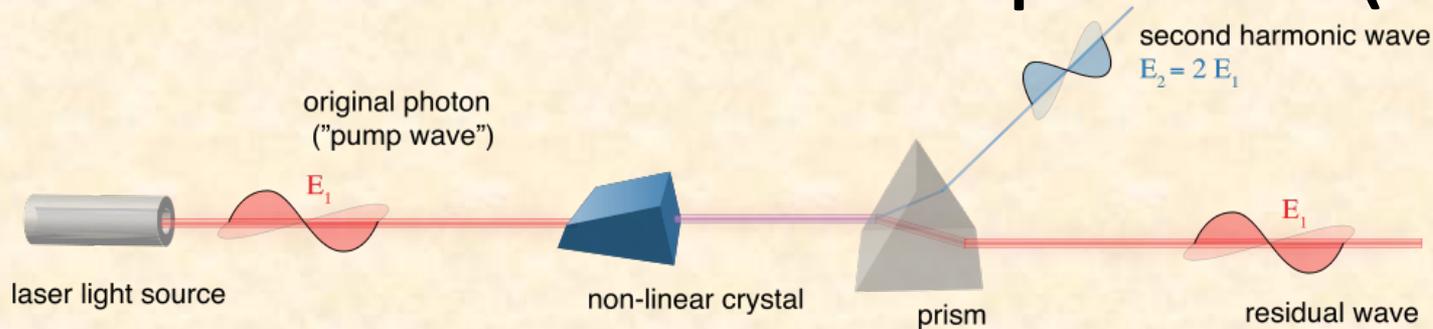
- Certains cristaux possèdent des propriétés non-linéaires.
- Grâce à ces propriétés il est possible de combiner deux photons pour en former un troisième dont l'énergie est la somme des deux photons initiaux.
- Si les deux photons initiaux avaient la même énergie, le photon final aura une énergie double, c'est à dire une longueur d'onde moitié moins grande.
- Deux photons de 1064nm donnent un photon de 532nm.

$$E_3 = E_1 + E_2$$

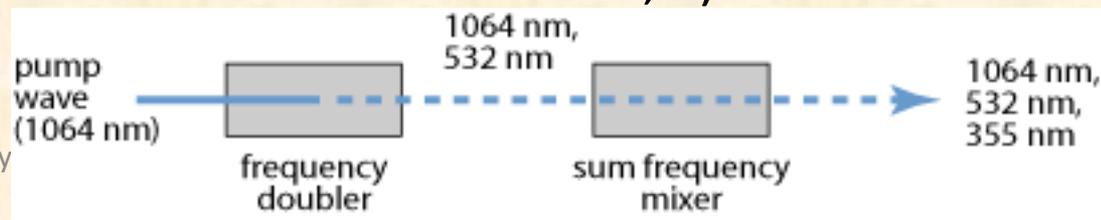
$$E = \frac{hc}{\lambda} \implies \frac{1}{\lambda_3} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$



Doublement de fréquence (2)



- Le doublement de fréquence permet d'atteindre des longueurs d'ondes autres que celles pour lesquelles une transition atomique intéressante existe. Par exemple, un Nd:YAG (1064nm) peut-être doublé pour donner un faisceau vert à 532nm.
- Il peut être doublé une seconde fois pour donner un faisceau dans l'UV à 266nm.
- La plupart des lasers dans le bleu ou l'UV sont basés sur ce mécanisme (car il existe peu de transitions atomiques à ces énergies élevées).
- D'autres combinaisons sont possibles (triplement de fréquence, combinaison de deux lasers différents,...).



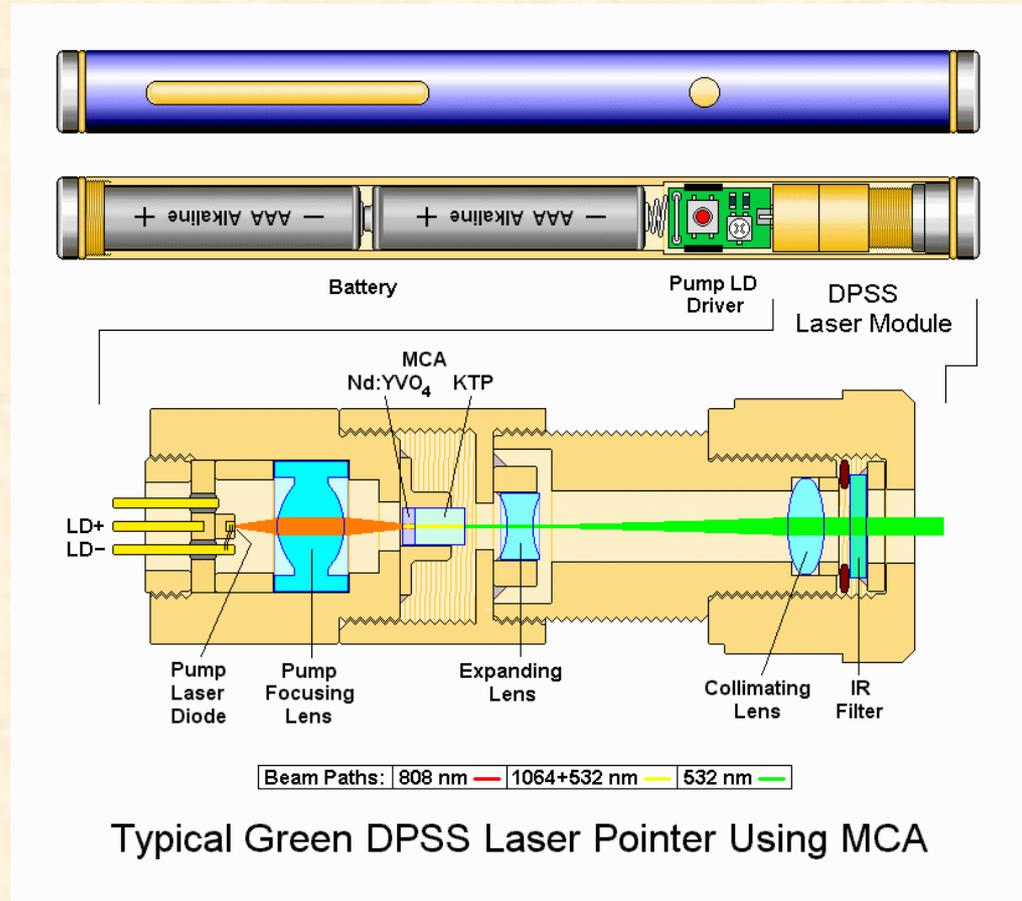


Cristaux non linéaires

- Le changement de fréquence est un processus utilisant des cristaux non linéaires.
- C'est donc un processus plus efficace à haute intensité.
- $$P_2 = \gamma P_1^2$$
- Il est préférable d'effectuer le changement de fréquence à haute intensité, par exemple avec un faisceau focalisé.
- Ces cristaux non linéaires sont souvent chers, fragiles, hydrophiles (absorbent l'eau),...
- Le processus de conversion est très sensible à la phase: si le cristal est bougé très légèrement l'efficacité de conversion peut chuter de manière très importante.

Laser pointeur vert

- Il n'existe pas de cristal bon marché permettant de donner directement un faisceau laser vert.
- Les pointeurs laser vert utilisent donc un cristal doubleur de fréquence.
- Une diode est utilisée pour pomper un cristal de Nd:YVO_4 émettant à 1064nm.
- Un cristal doubleur de KTP est ensuite utilisé pour convertir une partie de l'énergie du faisceau de 1064nm à 532nm.
- Attention: avec les lasers bon marché le filtre IR peut ne pas être présent!!!



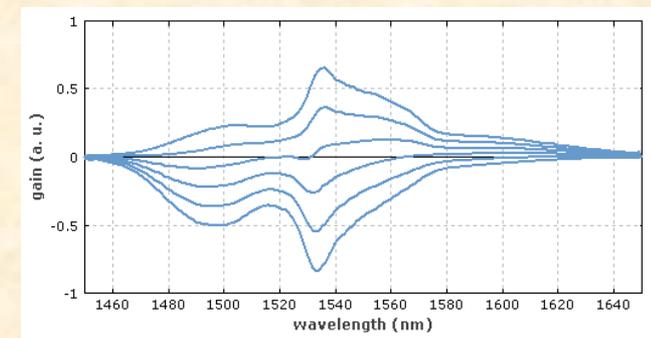
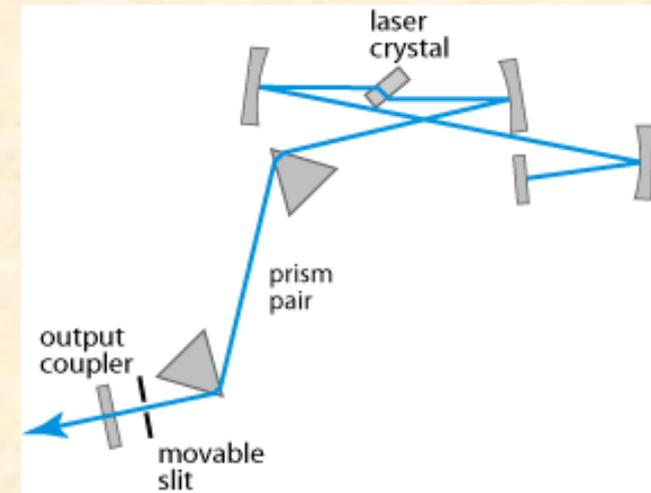
Autres techniques d'ajustement de fréquence



- Il est aussi possible de construire des lasers dont la fréquence est ajustable.
- Certains milieux amplificateurs sont très sensibles aux conditions environnementales.
- Par exemple la longueur d'onde des diodes lasers peut changer de 0.3nm/K !
- Si la longueur d'onde est importante, il faut contrôler de manière très précise la température de fonctionnement de la diode, malgré l'importante quantité de chaleur dégagée lors de leur fonctionnement.

Lasers à fréquence réglable

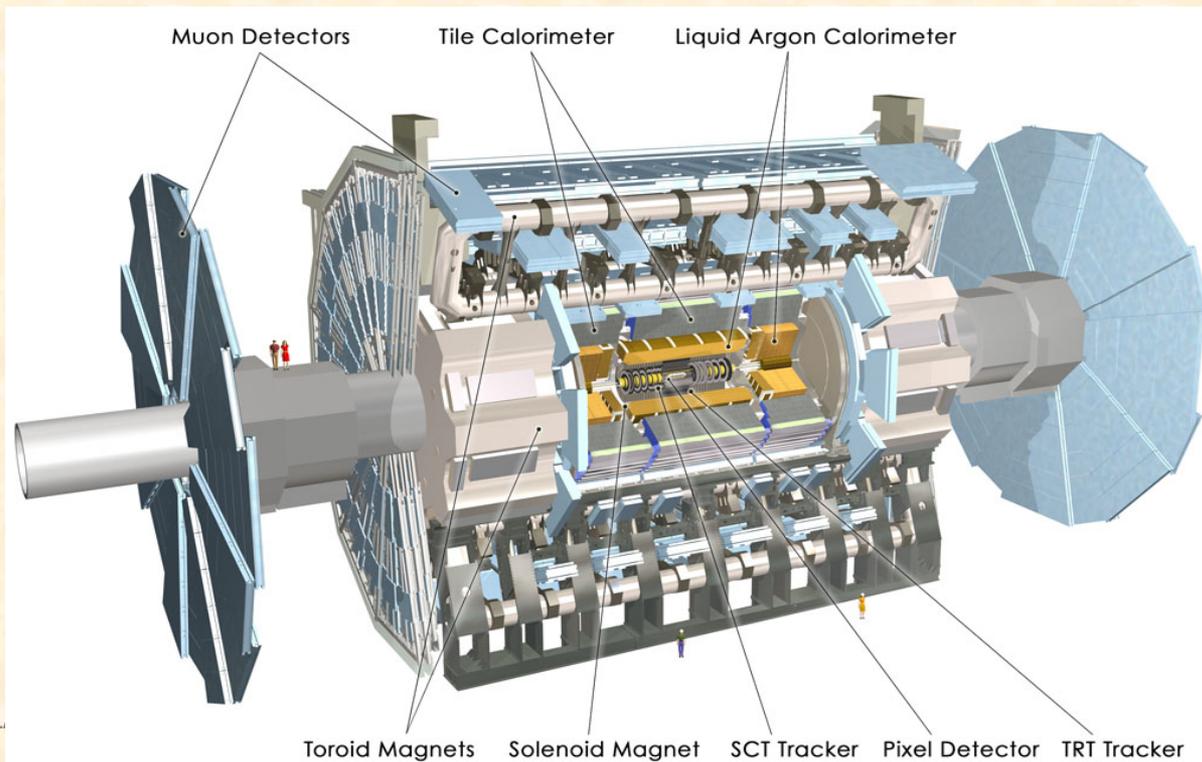
- Pour ajuster la longueur d'onde d'un laser il est aussi possible d'utiliser un filtre dans la cavité qui sélectionne une longueur d'onde donnée.
- Un prisme placé dans la cavité permet de sélectionner la longueur d'onde voulue.
- Cet ajustement peut être fait de manière rapide et automatique.
- Ces lasers ne fonctionnent de la sorte que si le milieu amplificateur a lui-même une bande très large.
- Exemple: Erbium



Application:

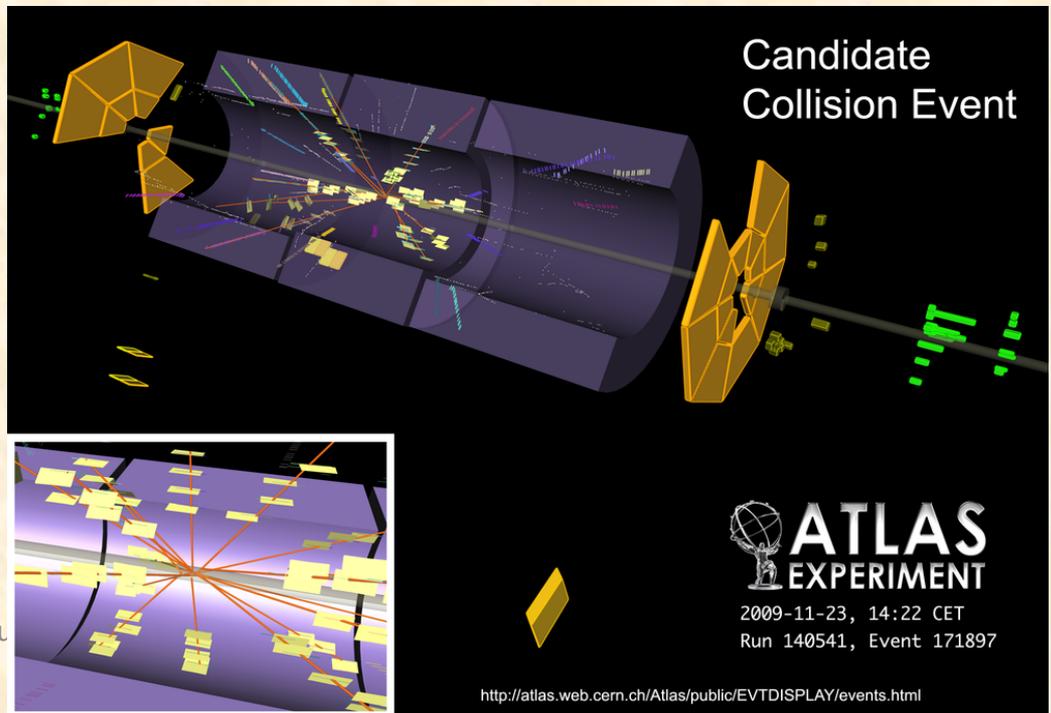
Alignement du détecteur de vertex en Silicium d'ATLAS

- ATLAS est l'une des principales expériences installées sur le LHC.
- Au cœur de l'expérience se trouve le détecteur de vertex en Silicium (SCT).



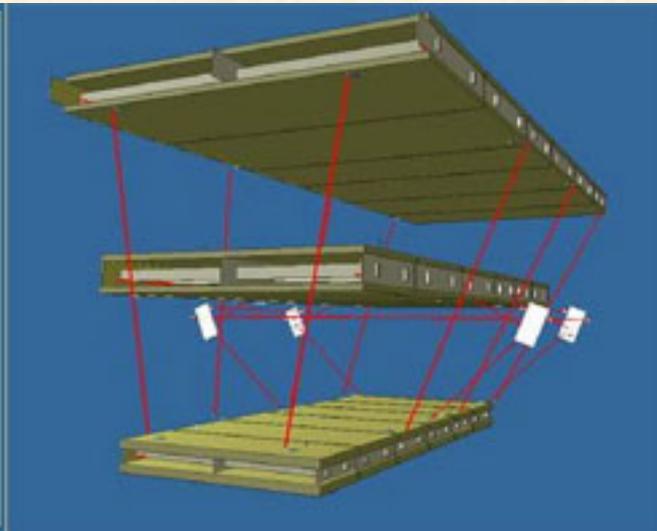
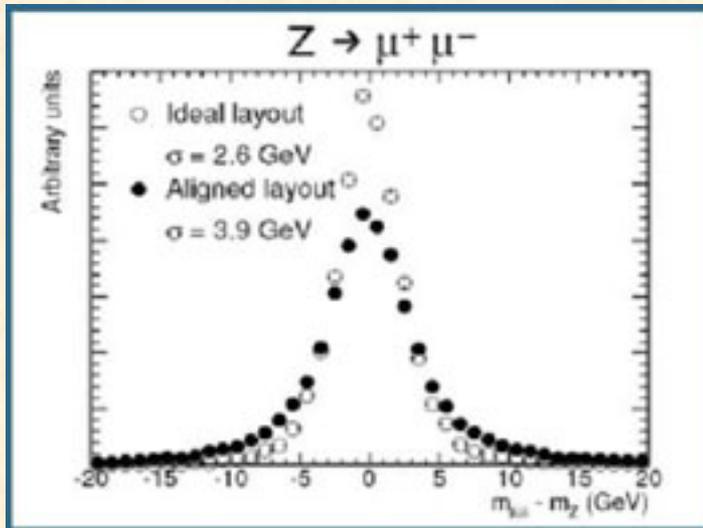
Application: ATLAS SCT (2)

- Le SCT permet de reconstituer avec précision l'origine des particules.
- Plus le SCT est précis, plus il est facile de savoir exactement d'où les particules proviennent et de savoir par exemple la distance qu'une particule a voyagé avant de se désintégrer.
- Au TeVatron ce genre d'information a été cruciale pour découvrir le quark top...



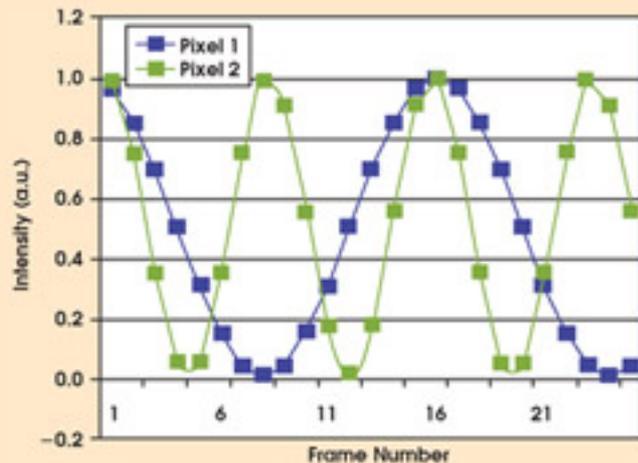
Application: ATLAS SCT (3)

- Pour obtenir la meilleure résolution possible grâce au SCT, il faut en permanence mesurer la position de chacun de ses éléments avec une précision de quelques micromètres.
- Cela se fait en utilisant un réseau de faisceaux laser et une technique appelée « frequency scanning interferometry » (FSI).



Application: ATLAS SCT (4)

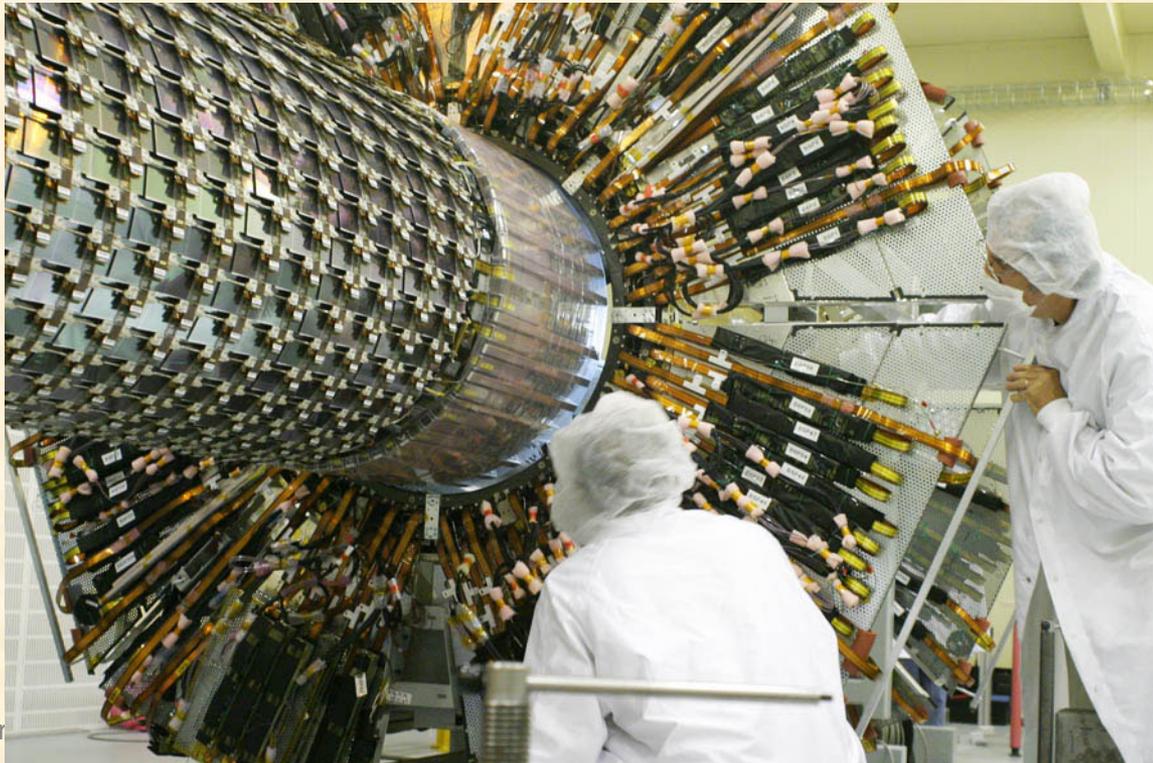
- En FSI, la longueur d'onde d'un laser à Erbium est modulée.
- Le faisceau de ce laser est envoyé jusqu'à un miroir placé sur une cible.
- Le signal reçu va être plus intense selon que la distance de la source à la cible est un nombre entier de longueurs d'onde ou pas
- Cette information permet de reconstruire la distance entre la source et la cible.



$$D = k_1 \lambda_1 = k_3 \lambda_3 = k_7 \lambda_7$$

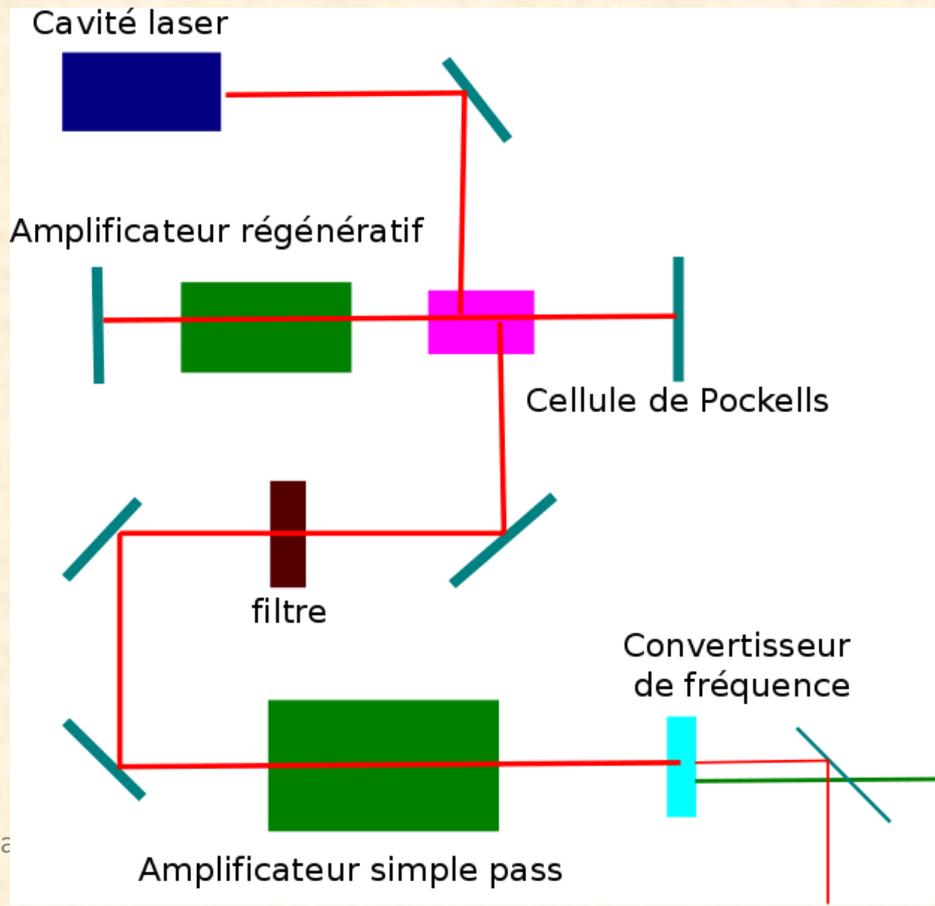
Application: ATLAS SCT (5)

- Grâce aux informations obtenues par FSI il est possible de reconstruire en permanence la position des différents éléments d'un détecteur complexe comme le SCT et donc d'améliorer la précision avec laquelle les particules sont mesurées.

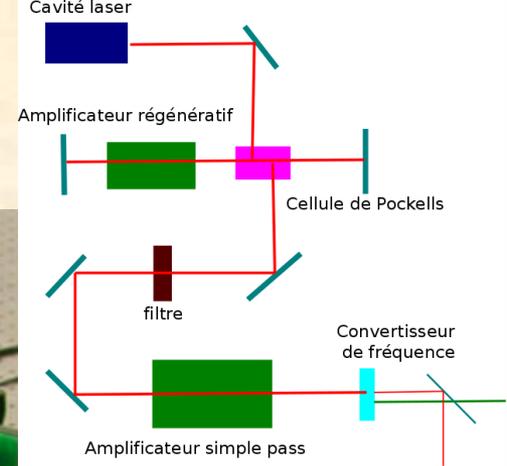


lasers de puissance: Amplificateurs régénératifs et chaîne d'amplification

- Pour atteindre des puissance importantes il faut parfois plusieurs étages d'amplification.



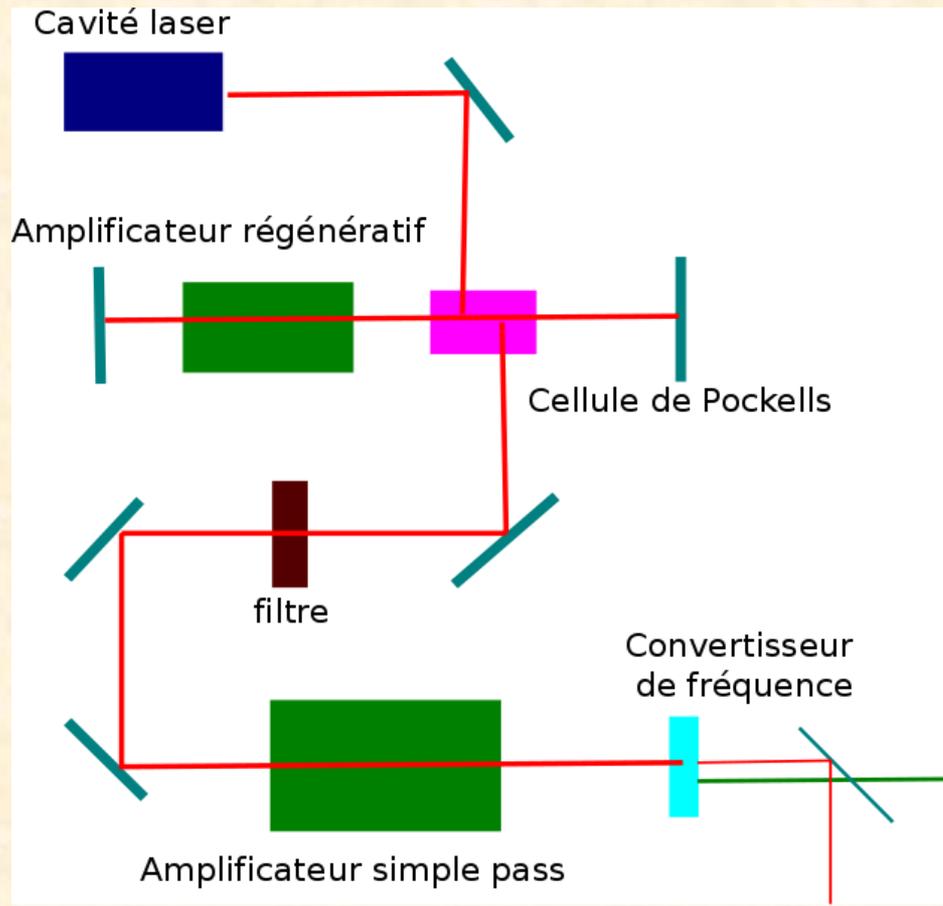
Vue d'un laser de puissance



Question:

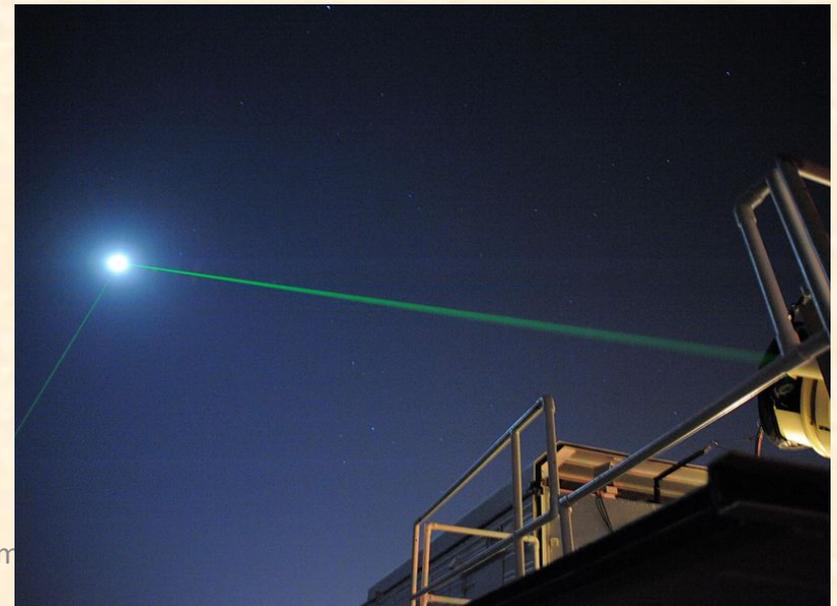
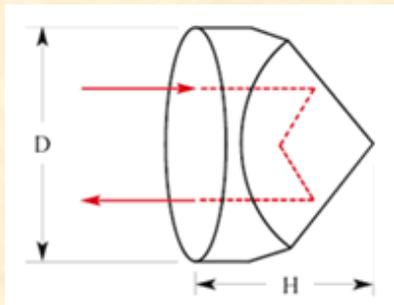
Dans quel régime faut-il utiliser l'amplificateur simple passe?

- Est-il préférable d'être en régime saturé ou en régime exponentiel?



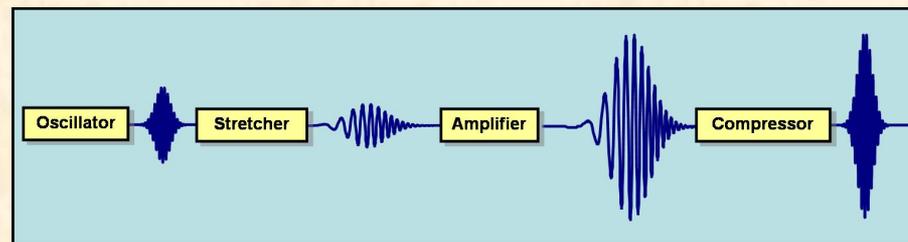
Application: Distance terre-lune

- Un laser de puissance est utilisé pour mesurer régulièrement la distance de la terre à la lune!
- Lors des missions Apollo des « rétro-rélecteurs » ont été déposés sur la lune.
- En tirant sur ces retro-rélecteurs avec un laser il est possible de mesurer le temps qu'il faut à la lumière pour faire un aller-retour et donc la distance terre-lune.



Vers des puissances encore plus hautes: CPA

- La puissance atteinte par les lasers est limitée par le seuil de puissance auxquels le milieu amplificateur s'abîme.
- Il est possible d'amplifier des faisceaux très larges spatialement mais cela limite la qualité du faisceau final.
- Un autre méthode a été proposé: le faisceau est étendu temporellement, amplifié puis compressé.
- Cette méthode s'appelle « Chirped Pulse Amplification » (CPA) est elle est couramment utilisée pour atteindre des puissance élevées.



Initial short pulse

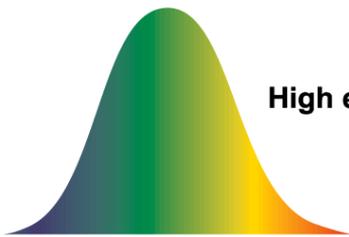


Short-pulse oscillator

The pulse is now long and low power, safe for amplification



High energy pulse after amplification



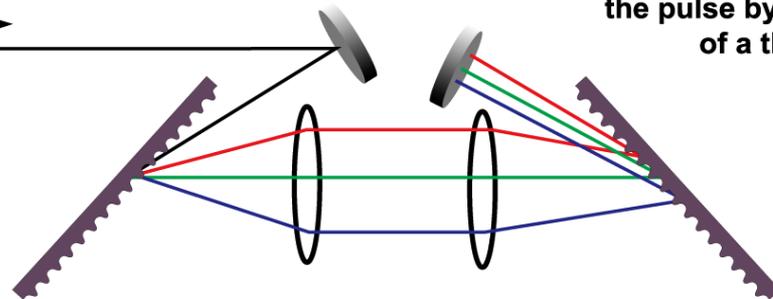
Power amplifiers



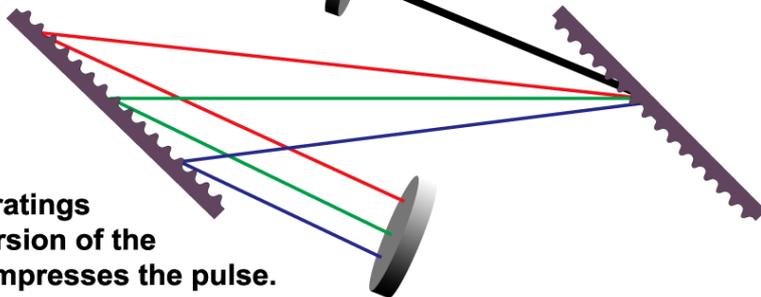
Resulting high-energy, ultrashort pulse



A pair of gratings disperses the spectrum and stretches the pulse by a factor of a thousand

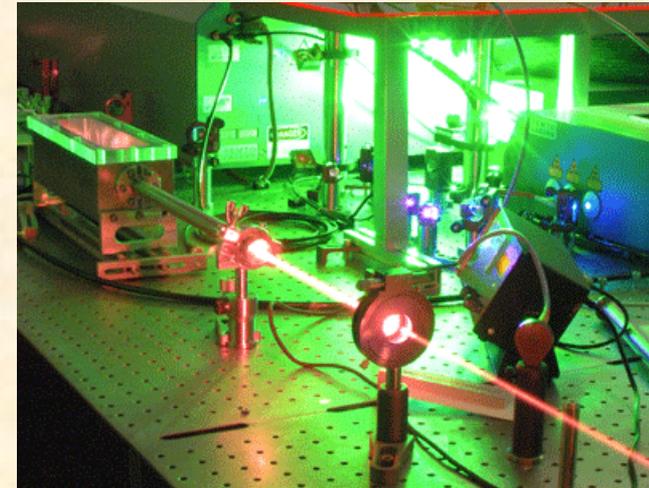


A second pair of gratings reverses the dispersion of the first pair, and recompresses the pulse.



Exemple: Laser Ti:Saphire

- Les lasers de saphir dopé au titane ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$) sont les lasers de puissance les plus populaires.
- C'est un laser à 4 niveaux.
- Le titane possède une bande amplificatrice très large (650nm à 1100nm) ce qui permet de produire des impulsions très courtes (produit temps-largeur spectrale) et donc de très haute puissance (jusqu'au Petawatt, 10^{15} W).
- Cette large bande permet aussi de fabriquer des lasers donc la longueur d'onde est ajustable.
- Les cristaux de Ti:Saphire doivent être pompés dans le vert avec une pompe très intense
=> pas de diode laser disponible
=> Les lasers Ti:Saphire sont souvent pompés par un autre laser, par exemple un Nd:YAG dont la fréquence a été doublée!

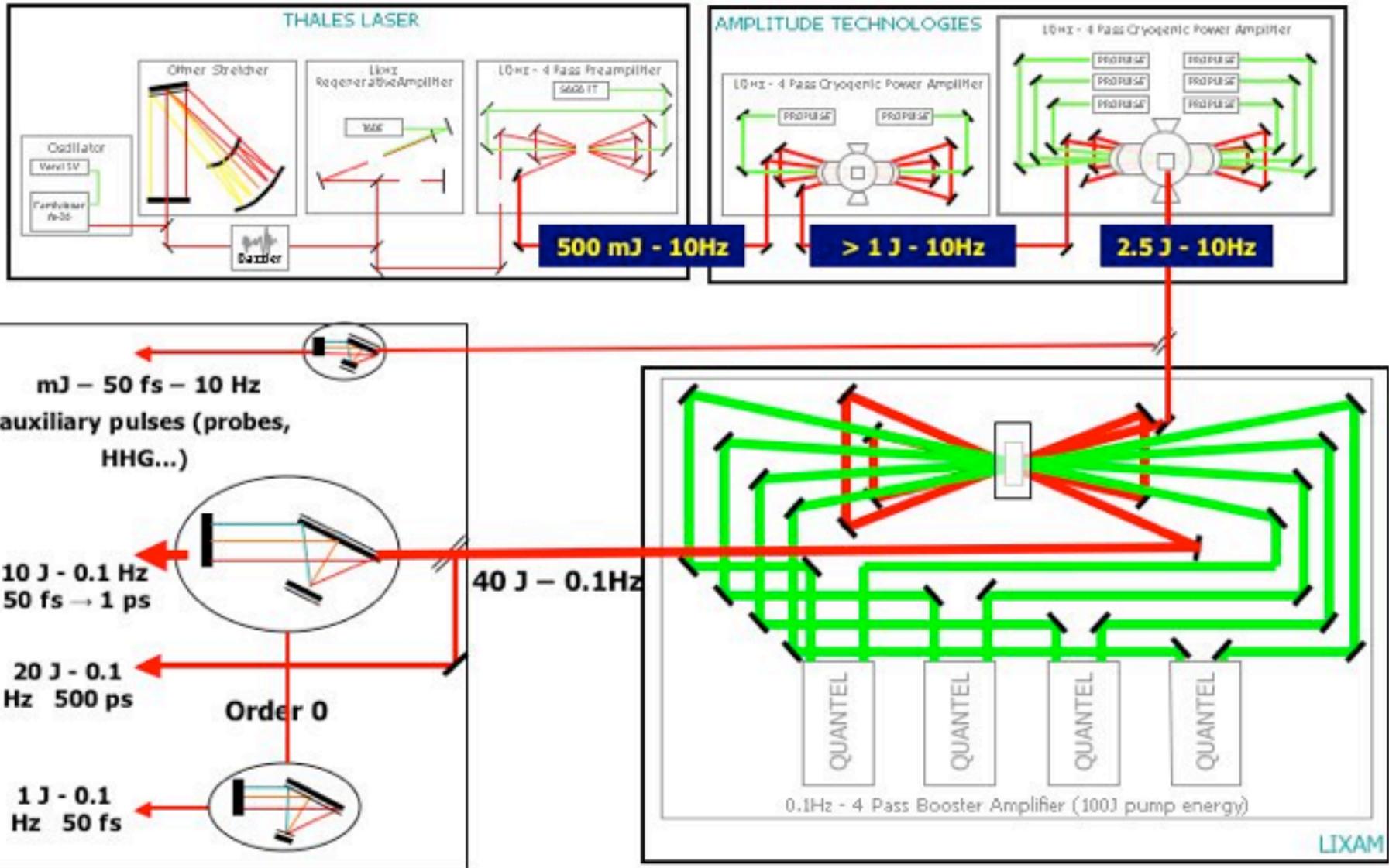


<http://www.elsa-laser.u-psud.fr>



Ti:Sa crystal of the high-energy amplifier (Crystal Systems, Salem)

Un exemple de laser Petawatt: Laserix



Laserix: la salle laser



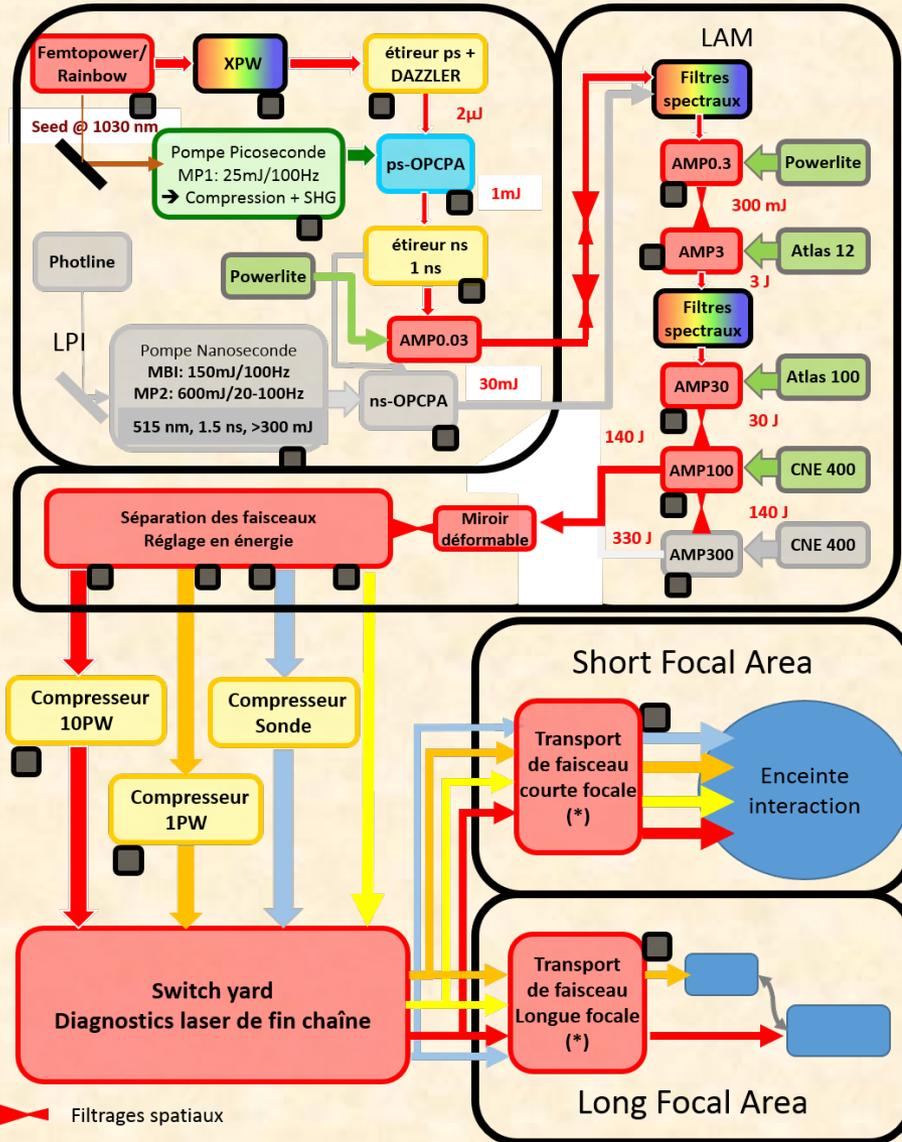
Le LASER Mégajoule



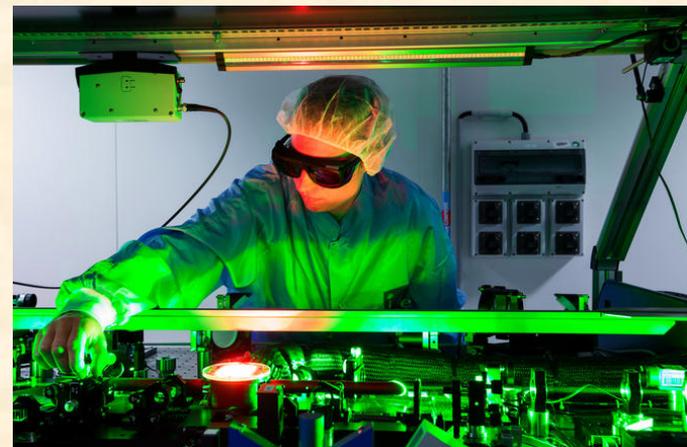
- L'un des lasers les plus énergétiques au monde (mais pas le plus puissant!).
- 176 lignes de faisceau convergeant sur la même chambre d'expérience.
- $\sim 1\text{MJ}$ pendant 1ns



Le LASER APOLLON



- L'un des LASERs les plus puissants au monde.
- 75J, 15fs.
- 2 faisceaux: 1PW et 5-10PW.
- Démarrage fin 2018.

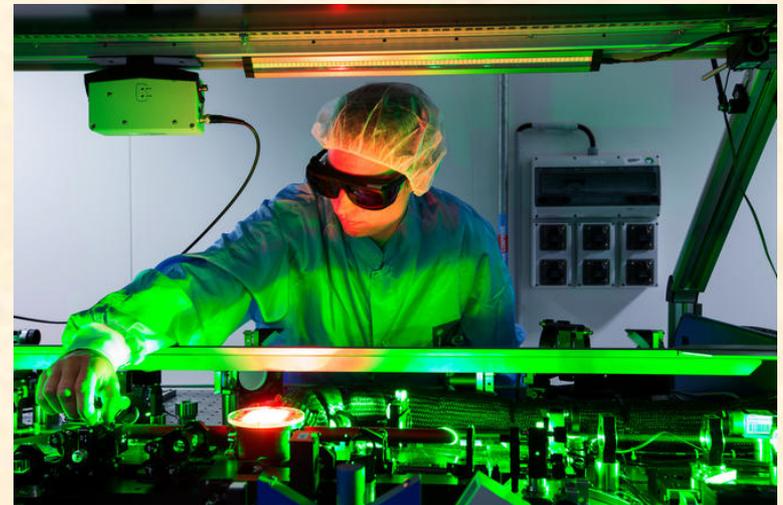


Megajoule et APOLLON

- Megajoule: 1MJ pendant 1ns soit 1PW.
- APOLLON: 75J pendant 15fs soit 5PW.
- Des durée très différentes et donc des applications différentes aussi.



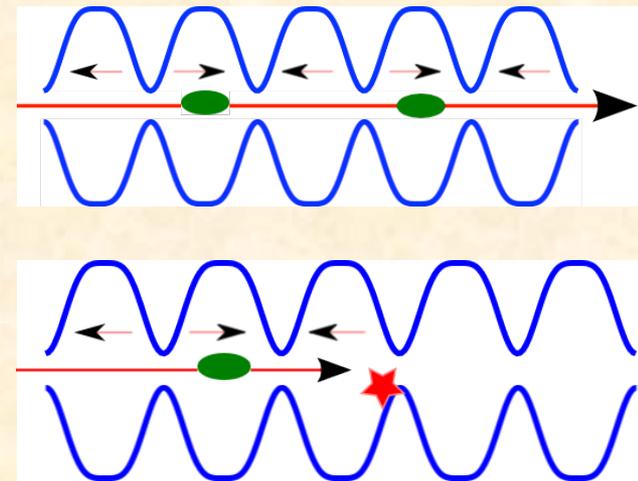
Nicolas Delerue, LAL Orsay



Ecole du détecteur à la mesure 2018:
LASERs

Application: Accélération par champs de sillage laser dans un plasma

- Les techniques actuelles d'accélération sont limitées: des gradients trop intenses entraînent des ruptures dans la cavité accélératrice.
- L'une des solutions à l'étude est de remplacer la cavité accélératrice par un plasma.
- L'accélération se fait alors par un champ de sillage dans le plasma.

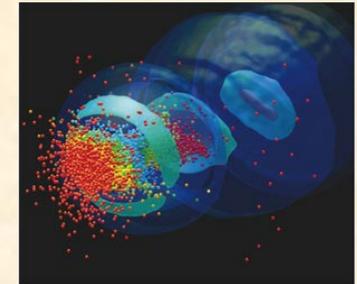


Exemple de champ de sillage

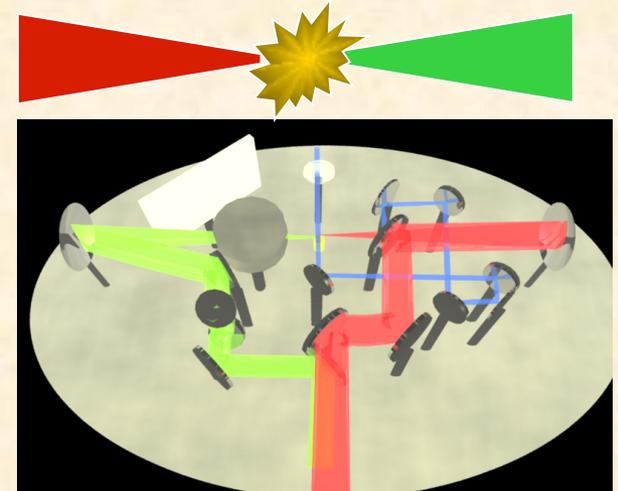
Source: <http://www.arwenmarine.com>

Application: Accélération par champs de sillage laser dans un plasma (2)

- Un laser intense peut créer un champ de sillage dans un gaz en l'ionisant à l'état de plasma.
- Des électrons peuvent alors « surfer » sur le champ de sillage et être accélérés.
- Pour ce faire, il faut des lasers de puissance Ti:Saphire Terawatt ou Petawatt.



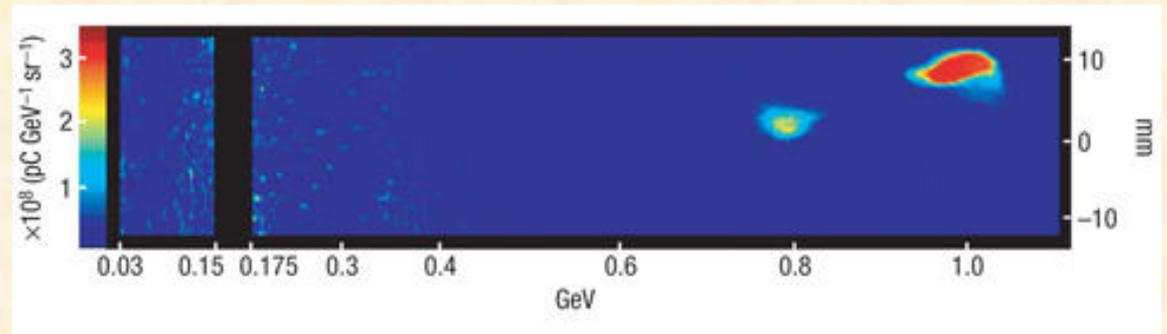
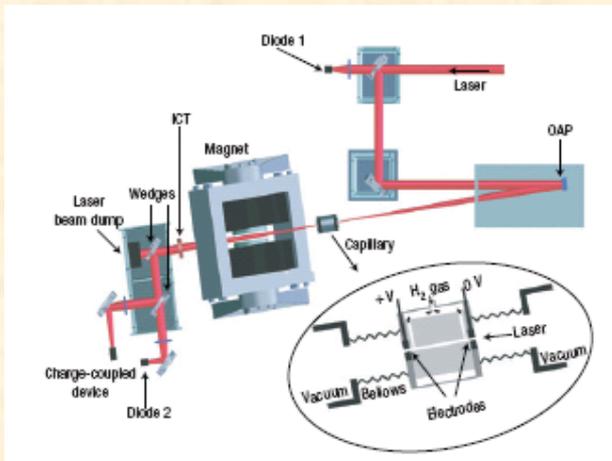
Champ de sillage dans un plasma
Source: CERN Courier



Faure et al., doi:10.1038/nature05393

Application: Accélération par champs de sillage laser dans un plasma (3)

- Avec cette technique des électrons ont été accélérés jusqu'à une énergie de 1 GeV sur une distance de seulement 33mm!
- Plusieurs groupes travaillent sur ces techniques en France.
- Deux labos de l'IN2P3 (LLR et LAL) travaillent sur la mesure des faisceaux produits.



Leemans et al, doi:10.1038/nphys418

Résumé

- Pour créer l'inversion de population requise au fonctionnement d'un laser, il faut pomper le milieu amplificateur, par exemple à l'aide de diodes lasers.
- Il existe plusieurs techniques qui permettent de produire des impulsions lasers courtes (ns, ps, fs...)
- A énergie égale une impulsion plus courte aura une puissance plus grande.
- Des cristaux permettent de diviser par deux la longueur d'onde émise par un laser (ou de faire des opérations plus compliquées).
- En utilisant plusieurs étages d'un laser il est possible d'atteindre des puissances très grandes.