

Titre : Lasers

Présentée par : Basile POUJOL

Rapport écrit par : Anna WILS

Correcteur : Agnès MAITRE

Date : 04/12/2020

### Bibliographie

Titre	Auteurs	Éditeur
Lasers, interaction lumière-atomes	B. Cagnac, JP Faroux	CNRS Editions
J'intègre, tout-en-un, PC/PC* (chap 30-31)		Dunod
Les lasers, cours et exercices corrigés	Dangoisse	
Optique (chap 11)	Houard	
Sextant (chap 4)		
Physique Quantique. Fondements tome 1 (chap 5 part 4)	Le Bellac	
Lasers et optique non linéaire	Christian Delsart	

## Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

PLAN :

Intro

I – Principe de fonctionnement

- 1- Rappel oscillateur électronique
- 2- Principe du Laser

II – Amplification par émission stimulée

- 1- Système à deux niveaux
- 2- Coefficients d'Einstein. Emission stimulée
- 3- Pompage

III – Cavité résonante

- 1- Cavité Fabry Pérot
- 2- Application : le LIDAR
- 3- Le Laser stationnaire

Conclusion

Niveau choisi pour la leçon : L3

Pré-requis :

- Oscillateurs électroniques
- Équation de Schrödinger
- Electromagnétisme dans les milieux diélectriques
- Interféromètres de Michelson et Fabry Pérot
- Effet Doppler
- Forme des orbitales atomiques

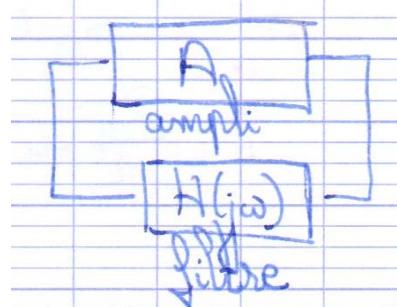
Intro : [Temps : 1'30]

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Source lumineuse omniprésente et très utile : Cohérente, monochromatique, faisceau parallèle et concentré

I – Principe de Fonctionnement [Temps : 10'30]

1) Rappel : oscillateur électronique

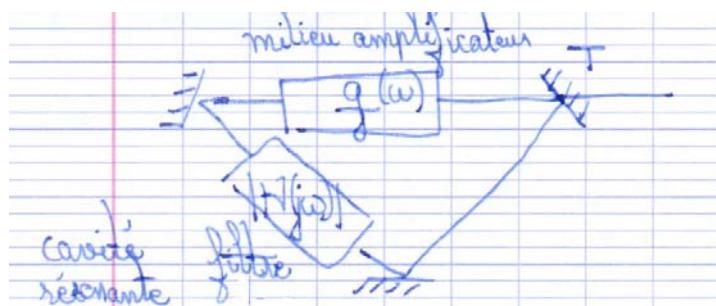


Manip' : Oscillateur à pont de Wien, démarrage des oscillations

Condition de Barkhausen :

$$A|H(\omega)| = 1$$

2) Principe du laser



Condition de Barkhausen :

$$\tilde{g}(\omega)(1 - T)|\tilde{H}(\omega)| = 1$$

*Rq : T représente les pertes et les quantités  $\tilde{x}$  désigne des complexes*

## II- Amplification par émission stimulée [Temps : 16]

Objectif : Nous allons dans cette partie nous intéresser au gain de l'amplificateur :

$$g(\omega) = |E| = |E_0 e^{i(\omega t - \tilde{n}z/c)}| = E_0 e^{n'' z/c}$$

On souhaite dans un premier temps calculer la réponse optique du milieu amplificateur :

$$\tilde{n} = n' + i n''$$

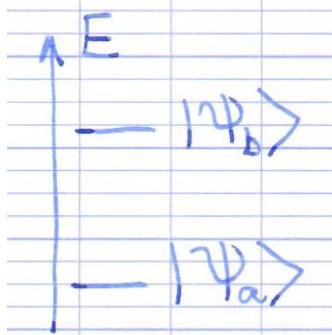
On sait que

$$\tilde{n} = \sqrt{1 + \chi} = \sqrt{1 + \frac{N\alpha}{V}}$$

avec  $\alpha$  la polarisabilité

### 1) Système à 2 niveaux

Hyp : 2 niveaux d'énergies non dégénérés (a, b) interagissent avec le champ électromagnétique  
Fonction d'onde du système :



$$|\psi\rangle = \tilde{a}|\psi_a\rangle + \tilde{b}|\psi_b\rangle$$

Etat initial :

$$\hat{H}_f = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \hbar\omega_0 \end{pmatrix}$$

Opérateur polarisation :

$$\hat{D} = \begin{pmatrix} 0 & d \\ d & 0 \end{pmatrix}$$

Opérateur Moment dipolaire :

$$\hat{H}_f = \hat{H}_f - E_x \exp(i\omega t) \hat{D} = \begin{pmatrix} 0 & \hbar\Omega_1 \exp(i\omega t) \\ \hbar\Omega_1 \exp(i\omega t) & \hbar\omega_0 \end{pmatrix} \text{ avec } \Omega_1 = \frac{E_x d}{\hbar}$$

Population dans chaque état :

$$\text{On pose } \alpha = \tilde{a} \text{ et } \beta = \tilde{b} e^{-i\omega t} : n_a = \alpha\alpha^* \text{ et } n_b = \beta\beta^*$$

Probabilité d'être polarisé :

$$\langle \hat{D} \rangle = \langle \psi | \hat{D} | \psi \rangle = D_0 e^{i\omega t} \text{ avec } D_0 = 2\alpha\beta^* d$$

On applique Schrödinger aux états  $|\psi_a\rangle$  et  $|\psi_b\rangle$  (pour obtenir  $\alpha$  et  $\beta$ )

$$\frac{d\alpha}{dt} = i \frac{\Omega_1}{2} \beta$$

$$\frac{d\beta}{dt} = i \frac{\Omega_1}{2} \alpha + i(\omega - \omega_0) \beta$$

A l'équilibre,  $D_0$  est stationnaire :

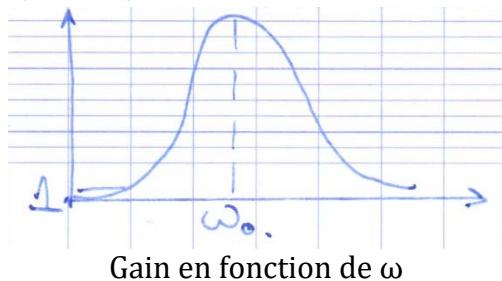
$$D_0 = \frac{\Omega_1 d}{\omega - \omega_0 - i\gamma} (n_b - n_a)$$

Retour sur l'indice optique et plus précisément sur  $n''$

$$n'' = \frac{1}{2} \chi'' = \frac{n}{2V} \Im(\frac{D_0}{E_0}) = \frac{nd^2}{2hV} \frac{\gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2} (n_b - n_a)$$

Pour avoir du gain, il faut que  $n'' > 0$  et donc que  $n_b > n_a$  : **Inversion de population**

$$g(\omega) = e^{n'' \frac{\omega}{c}} \simeq 1 + \frac{nd^2 L}{2hVc} \frac{\gamma\omega}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2} (n_b - n_a)$$



## 2) Coefficients d'Einstein. Emission stimulée

Grâce au développement de la partie précédente nous pouvons obtenir l'équation d'Einstein :

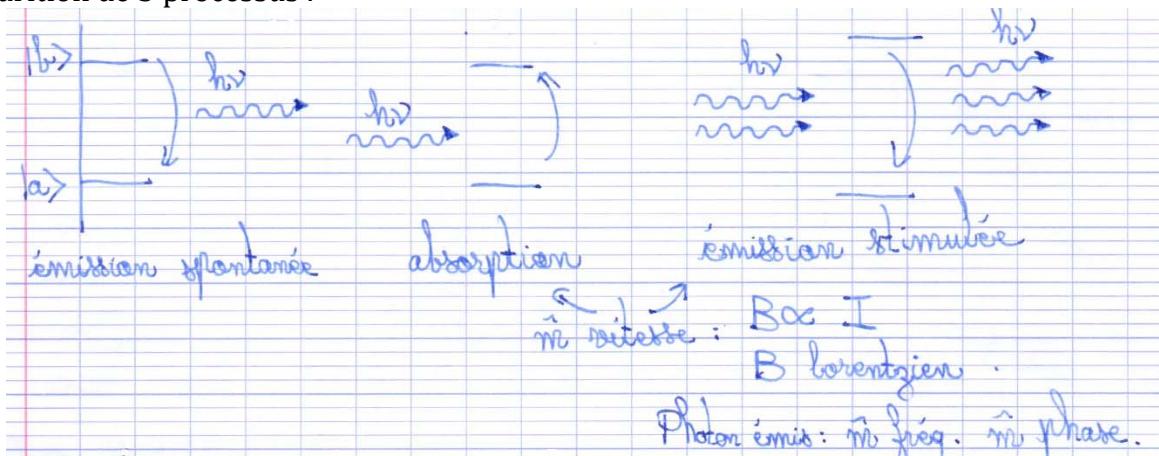
$$\frac{dn_b}{dt} = \frac{d\beta\beta^*}{dt} = \dots = -\frac{\Omega_1}{2d} \operatorname{Im}(D_0)$$

**Equation d'Einstein :**

$$\frac{dn_b}{dt} = B(\omega)(n_a - n_b) - An_b$$

avec  $B(\omega) = \frac{\Omega_1^2 \gamma}{2((\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2)}$  et en ajoutant un coefficient A à la main pour l'émission spontanée

Apparition de 3 processus :



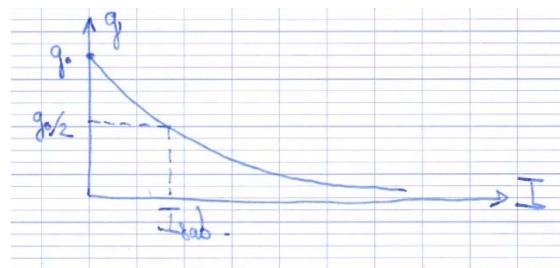
Condition pour avoir émission stimulée :

$$n_a - n_b = \frac{A}{B(\omega)} n_b \geq 0$$

Il faut apporter de l'énergie au système pour réaliser cette condition

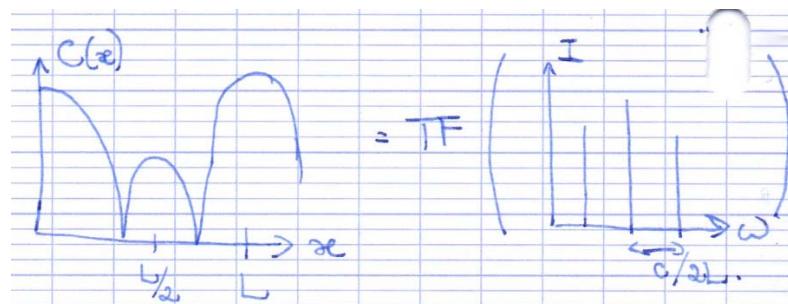
## 3) Pompage [Calcul sur slides]

$$n_b - n_a \propto \frac{I}{1 + \frac{I}{I_{sat}}} \Rightarrow g \propto \frac{g_0}{1 + \frac{I}{I_{sat}}}$$



### III- Cavité résonante [Temps : 14]

Manip' : voir sextant (avec le Michelson de poche, rq pas hyper concluant)



Nous voulons avoir des informations sur le spectre émis par le laser (figure de droite), pour cela nous utiliserons le Michelson de poche.

Nous allons regarder les extinctions du contraste des interférences en fonction de la différence de marche entre les deux miroirs (fig de gauche).

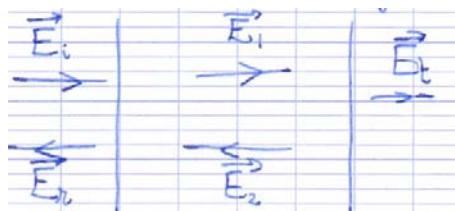
Soit  $x = \Delta/2$ , en  $x = L$  le contraste est maximal.

Si, par exemple, le spectre a trois raies, on observera des extinctions du contraste en  $x = L/3$  et  $x = 2L/3$ .

(pour plus de détails voir : Sextant, analyse du spectre laser p200)

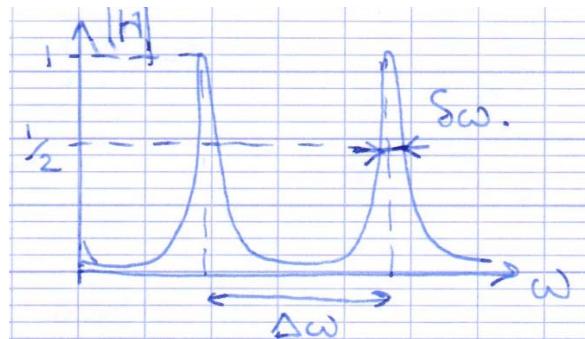
(à gauche variation de contraste de la figure d'interférence, à droite la transformée de Fourier dont elle est issue. On reconnaît la caractéristique d'une cavité Fabry-Pérot)

#### 1) Cavité Fabry Pérot



On a vu prérequis comment calculer le comportement en sortie de la cavité Fabry-Pérot :

$$|H|^2 = \frac{E_t^2}{E_i^2} = \frac{1}{1 + \frac{4R}{T^2} \sin^2(\frac{\omega L}{c})}$$



La finesse du dispositif se calcule comme suit :

$$\mathfrak{F} = \frac{\Delta\omega}{\delta\omega} = \frac{\pi c}{L} \frac{2\sqrt{RL}}{T_c} = \frac{2\pi\sqrt{R}}{T}$$

ODG :  $\mathfrak{F} \simeq 10^3$

Précision en fréquence :

$$\text{ODG} : \frac{\delta\omega}{\omega} = \mathfrak{F}^{-1} \frac{\lambda}{L} \simeq 10^{-8}$$

## 2) Application le LIDAR

Cette précision est exploitée dans les LIDAR

**Slide : Image du laser et des cartographies observées**

Dispositif qui exploite l'effet doppler :

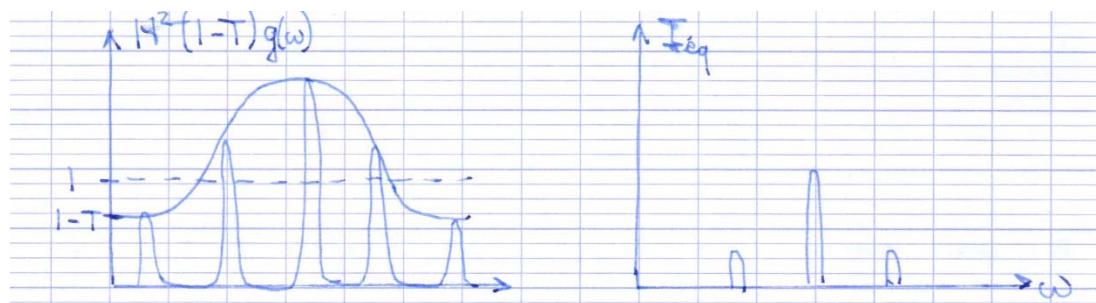
$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

$$\frac{\delta f}{f_0} \simeq \frac{2v}{c} \simeq 10^{-8}$$

## 3) Le Laser stationnaire

Point de fonctionnement du laser et raies transmissent par le laser:

$$g_0(\omega)(1-T)|H(\omega)|^2 = 1 + \frac{I}{I_{sat}}$$



## Conclusion [Temps : 2']

- Laser : oscillateur optique
- Amplification par émission stimulée découle de l'éq de Schrödinger
- Filtrage peut être effectué par une cavité Fabry-Pérot
- Ouverture sur les lasers semi-conducteurs

## Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Lors du démarrage des oscillations de l'oscillateurs le signal n'était pas parfaitement sinusoïdal, pourquoi ? Est-ce qu'on peut avoir la même chose sur un laser ?

Pour être certain de démarrer les oscillations j'ai pris  $g > 1$ , régime non linéaire. Lors du calcul du gain dans le laser on fait un dvpmnt limité, si le milieu est très dense ce dvpmnt n'est plus valide et nous pouvons observer un phénomène similaire.

Dans votre modèle l'émission spontanée n'est pas prise en compte, pourquoi ? C'est quoi l'émission spontanée ?

Ici modèle semi-classique, il faudrait considérer l'électrodynamique quantique pour décrire l'émission spontanée. C'est un processus aléatoire dans le temps et indépendant des paramètres extérieurs, correspond à une interaction avec les fluctuations du vide.

Coefficients a et b, y-a-t-il un lien entre eux ?  $|a|^2 + |b|^2 = 1$

Pourquoi avez-vous des anneaux sur le Michelson ?

Réglé en lame d'air

Combien avez-vous de raies dans un laser ? C'est quoi la largeur de raies typique d'un laser ? Est-ce que tous les lasers ont plusieurs raies ?

Dépend de la largeur du gain et de la largeur des pics issus du Fabry-Pérot  
 $10^{10} \text{ à } 10^{15} \text{ Hz}$

On peut mettre un filtre pour sélectionner le mode qui nous intéresse (filtre de Lyot) et rendre aussi le laser monomode. Pour rendre un laser monomode on peut aussi jouer sur la taille de la cavité

Est-ce que c'est envisageable d'écartier les pics issus du Fabry Pérot pour un laser semi-conducteur ? Quelle taille fait cette cavité Fabry-Pérot ?

Ordre du mm au µm (rq pour laser He-Ne de l'ordre de 17cm). Pour ces lasers le gain est plus relativement homogène, il est plus facilement monomode

Qu'est ce qui fixe  $\omega_0$  ?

*L'écart énergétique entre 2 niveaux. (Rq l'enveloppe du gain n'est pas forcément centré sur le faisceau le plus amplifié, d'ailleurs la fréquence du laser n'est pas stable naturellement en général, nécessite d'un contrôle actif de la longueur de la cavité)*

### Laser à solide que pouvez-vous dire dessus ?

*Milieu = cristal (par ex pl Al2O3) les électrons sont excités, pertes non radiatives dans le réseau cristallin puis désexcitation*

*Le gain est plus homogène (dans les laser à gaz pls classe de vitesse qui ne voient pas les autres). Le gain sature sur l'ensemble de la courbe et un seul mode lase. Pour un laser à gaz, le gain est inhomogène et le gain va saturer pour chaque groupe d'atomes faisant partie de la même classe de vitesse. . Plusieurs modes vont pouvoir laser*

*Le plus connu NdYAG (ophtalmologie, nettoyage de façade (cf : c'est pas sorcier))*

### Que connaissez-vous comme lasers actuels ? Et comme applications ?

*He-Ne, Argon, Xénon, Crypton, Diode laser (lecteur CD), semi-conducteur (utilisés dans toutes les télécommunications, fibre optique, téléphone, internet...) (Rq : les lasers à gaz ne sont pas les plus utilisés, juste pour l'enseignement et en métrologie car ils sont plus stables)*

*Mesure distance Terre-Lune, LIDAR, Correction de la myopie*

### Faisceau laser fortement étroit spatialement ? Comment règle-t-on ce mode spatial ? Dessiner les fronts d'ondes ?

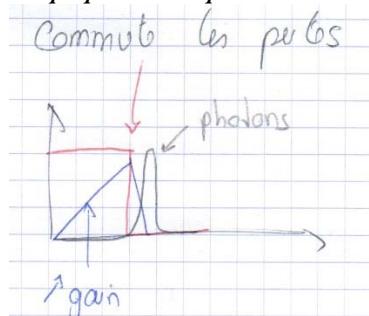
*Non, dépend à quelle distance on se trouve sur le mode gaussien. Proche du col du faisceau dans la zone de Rayleigh, le laser est une quasi onde plane. Loin de la zone de Rayleigh, il peut être assimilé à une onde sphérique.*

*Le mode du laser est sélectionné par la cavité. Pour une cavité plan convexe par exemple, le mode résonant épouse la courbure des deux miroirs. En particulier le front d'onde est plan au niveau du miroir plan.*

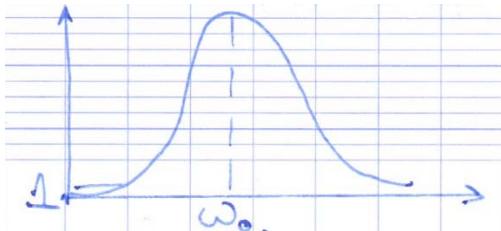
**Que pouvez-vous dire sur la cohérence spatiale ? Peut-on observer du speckle avec une lampe ?**  
*Grande cohérence spatiale, on peut définir un front d'onde du mode laser,. Speckle lié à la cohérence spatiale (les grains d'une feuille éclairés par une onde cohérente, diffusent la lumière. Les interférences entre ces sources donnent le phénomène de speckle. Le speckle n'est pas observé avec une lampe*

### Que savez-vous des lasers à impulsion ?

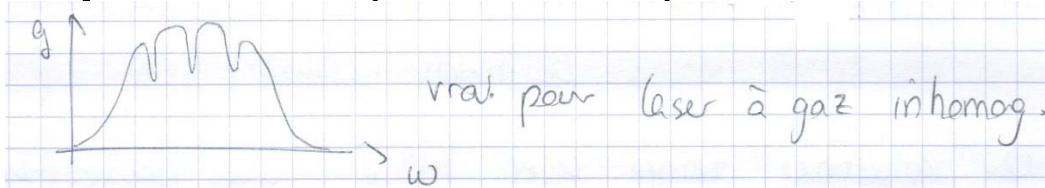
*On apporte de l'énergie en permanence (le gain augmente) mais on s'arrange pour qu'il y ait plus de pertes que de gain (en pratique on peut utiliser des cellules de pockels dont on peut contrôler l'indice optique et la birefringence avec la tension appliquée. en les associant avec un polariseur à 45° des axes neutres, on peut en faire des interrupteurs contrôlés électriquement). On arrive ainsi à obtenir une très forte inversion de population et d'emmagerer de l'énergie dans le milieu à gain. On commute les pertes -> Très forte inversion de population pour ramener le gain = pertes, libère beaucoup de photons*



### Gain en fonctionnement stationnaire ?

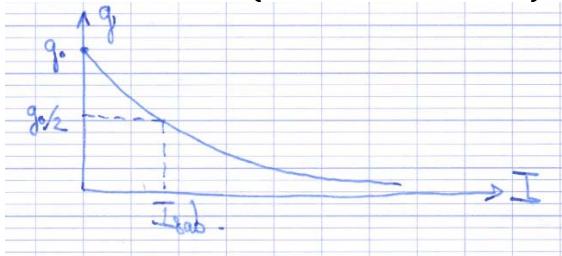


### Gain quand I est non nul ? (I intensité intracavité)



On voit là la saturation du gain pour les différentes fréquences (ici classes de vitesse des atomes pour un laser à gaz)

### Gain fonction de I (intensité intracavité) ?



## Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

Très bonne leçon, beaucoup de commentaires de physique tout au long des calculs

Le lien avec l'oscillateur électronique a été apprécié

En 40 minutes on ne peut pas tout faire sur les lasers

Le choix pédagogique de cette leçon a été d'axé l'étude sur le gain

Il y a d'autre façon de la traiter : En admettant les coefficients d'Einstein on peut développer d'autres aspects, passer plus de temps sur le Fabry-Pérot, sur le faisceau gaussien, sur la cohérence spatiale, les différents types de laser (continus, en impulsion...)

Leçon ouverte qui peut plaire à un jury d'agreg, il est important de se poser la question de comment la traiter

## Partie réservée au correcteur

### Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Excellente leçon. Plan bien traité avec un bon équilibre entre les développements théoriques et la physique. Le lien avec l'oscillateur électronique était bien venu

### Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Il y a de nombreuses façons de traiter le laser et cette leçon en était un exemple, avec un point important centré sur le gain.

En 40mn, les choix sont indispensables et il n'est pas possible de tout dire.

Dans les choix différents de ceux qui ont été faits dans cette leçon, on peut limiter la partie gain aux équations d'Einstein et accorder plus de place au mode gaussien, et à la discussion de la cavité. On peut alors parler de la cohérence du laser. On peut aussi parler plus des différents types de lasers ou approfondir la partie applications. Le tout est d'avoir un plan cohérent et de ne pas dépasser 40mn

### Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Il n'y a pas pour l'instant de leçon Lasers dans l'agrégation docteur

Tout dépend de ce que l'on veut discuter dans la leçon

Si on veut parler du mode gaussien, on peut discuter le mode gaussien d'un laser hélium Néon de la collection

Pour le Fabry Perot, il y en a un Fabry Perot confocal dans la collection (absorption du rubidium). Il faut cependant bien maîtriser le montage pour le présenter

### Bibliographie conseillée :

Delsart,

Dangoisse,

Cagnac