

Institut Langevin

Thermalisation de photons

Étudiant : Ary Portes

Encadrants : Valentina Krachmalnicoff et Kevin Chevrier

Mai
2022

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Principe de la thermalisation	1
1.2	Fluorescence	2
1.3	Expérience	2
2	Révision bibliographique	3
3	Méthodes	3
3.1	Optimisation	3
3.2	Création des échantillons	5
3.3	Système optique	5
3.4	Analyse Spectrale	6
4	Conclusion	7
5	Références	7

1 Introduction

1.1 Principe de la thermalisation

Le processus de la thermalisation décrit l'interaction de plusieurs particules ou molécules pour arriver à l'équilibre thermique et sa compréhension est essentielle pour domaines comme la thermodynamique, qui étudient la transmission d'énergie entre plusieurs corps. Ce travail se concentre sur l'utilisation de la thermalisation pour l'étude des bosons, plus spécifiquement le photon.

Récemment, la thermalisation est souvent étudiée pour la production de l'état de la matière connu comme Condensat de Bose-Einstein(CBE), dont un grand nombre de particules se comportent comme un ensemble et d'un point de vue ondulatoire, ces corps forment une interaction qu'amène au état fondamental, de plus basse énergie, comme montré dans l'image 1. L'obtention de cet état de la matière est souvent réalisée avec des atomes, dont l'interaction est suffisamment forte pour rendre possible la thermalisation sans l'utilisation d'un milieu externe. D'une autre façon, bien que la thermalisation des photons puisse se réaliser, elle est plus difficile que celle des atomes.

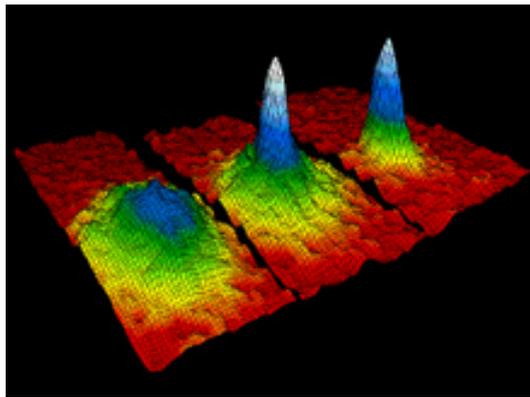


FIGURE 1 – Condensat de Bose Einstein[1]

Pour les photons, l'interaction entre les particules a une intensité insuffisante pour réaliser la thermalisation. Pour cette raison, pour arriver à la thermalisation des photons, il est souvent utilisé des molécules fluorescentes qu'ont une bonne interaction avec la lumière et permettent le découplage entre le nombre de photons et la température. La thermalisation de la lumière a été déjà réalisée avant avec l'utilisation d'une cavité optique, toutefois, à peine récemment, la théorie de ce processus a été démontré récemment en utilisant des milieux complexes[2], ce que confirme l'importance d'une vérification expérimentale du phénomène. Dans ce sens, ce travail essaye de comprendre l'influence de paramètres comme indice de réfraction, taille et concentration de sphères diffuseurs dans le spectre d'émission de molécules fluorescentes.

1.2 Fluorescence

Les molécules fluorescentes peuvent être vues d'une façon simplifiée comme des systèmes à deux niveaux. Les électrons du niveau inférieur, de plus basse énergie, peuvent monter au niveau supérieur parmi l'interaction avec un photon, ce qui s'appelle absorption, montré dans la partie gauche de l'image 2. Comme le photon doit fournir toute l'énergie pour le changement d'état, ce photon doit avoir une énergie égale ou plus grande que la différence entre les états du matériau.

Pour les photons déjà dans le second niveau, deux possibilités existent. Dans la première, appelé émission spontanée, l'électron va retourner au niveau de plus basse énergie et émettre un photon, qui a l'énergie de la différence des niveaux, comme montre l'image 2. Enfin, pour l'émission spontanée, la descente de l'électron est stimulée par son interaction avec un autre photon. Par conséquent, après changer de niveau, il existe l'émission de deux photons, différemment des cas précédents.

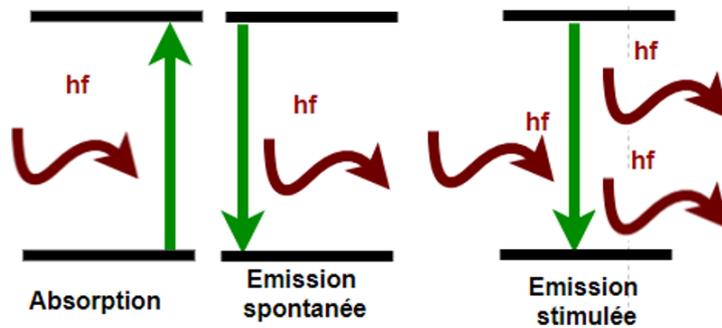


FIGURE 2 – Représentation des différentes interactions électron-photon pour un système à deux niveaux

Pour notre expérience, ces trois genres d'interaction électron-photon sont importants pour permettre la thermalisation de la lumière. Chaque molécule va absorber et ensuite réémettre un photon pour qu'il puisse interagir avec une autre molécule et par conséquent partager de façon homogène l'énergie des photons.

1.3 Expérience

Le diagramme de l'expérience développé peut être vu dans la figure 3. D'abord, un laser est utilisé comme source de lumière cohérente et monochromatique. La longueur d'onde de cette lumière dépend de la molécule utilisée, vu que les photons doivent avoir l'énergie pour permettre le changement de niveau dans la substance. Pour nos expériences, la rhodamine 6G a été choisie, ce qui nous a amené à l'utilisation d'une source lumière de 500 nm.

Dans ce genre d'expériences, il est nécessaire que la lumière interagisse dans toutes les parties de l'échantillon. Pour cette raison, des sphères diélectriques sont ajoutés à la solution pour que la lumière soit bien diffusée dans la solution. La lumière d'émission de la rhodamine a été analysée parmi l'utilisation d'un spectroscope branché à une fibre optique que captait la lumière proche de l'échantillon. De

cette façon, plusieurs expériences ont été réalisées et les spectres d'émission ont été comparés pour vérifier la théorie proposée précédemment.

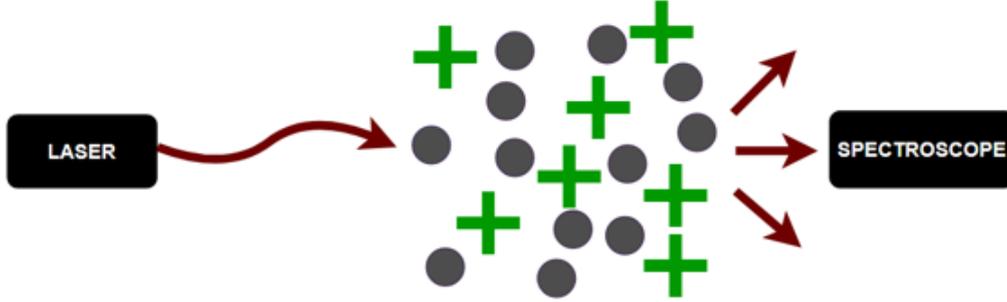


FIGURE 3 – Diagramme de l'expérience réalisé, dont les cercles représentent les sphères diélectriques et les croix les molécules de rhodamine

2 Révision bibliographique

Pour commencer nos travaux, nous avons réalisé une recherche bibliographique pour mieux connaître le domaine, mais aussi pour savoir quels sont les derniers développements pour le secteur. Pour réaliser cela, notre recherche a été focalisée sur le sujet des lasers aléatoires, vu qu'ils partagent la même structure de notre expérience, mais aussi sur le sujet de la thermalisation de photons, ce qui est notre but dans ce travail.

Parmi les travaux vérifiés, le rapport développé par Don Jayamanne à l'Institut Langevin a été utilisé comme source principale[2]. Dans son travail, il décrit parmi l'utilisation de simulations numériques la thermalisation de photons pour un milieu complexe, composé de sphères diélectriques et de molécules fluorescentes. Notre projet veut donc démontrer ce processus expérimentalement et confirmer le modèle proposé par Don Jayamanne.

3 Méthodes

3.1 Optimisation

Pour la création d'un modèle d'étude, nous avons d'abord utilisé comme référence l'équation du temps de diffusion de la lumière (τ_D) dans un milieu complexe[1] :

$$\tau_D = \frac{3(1-g)\sigma_s n L^2}{\pi^2 v_e} \quad (1)$$

dont g est le cosinus moyen de la fonction de phase, σ_s est la section efficace de diffusion, dépendant du diamètre du diffuseur d et de son indice optique n_{diff} , n la concentration des diffuseurs, L est l'épaisseur du milieu, v_e est la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu. Un autre paramètre important est le temps d'absorption, τ_a , qui est caractéristique de la molécule fluorescente.

Pour que la thermalisation soit possible, il est nécessaire que la relation entre ces deux paramètres, c'est-à-dire τ_D/τ_a , soit bien plus grande que 1. Pour réaliser cela, nous avons optimisé les paramètres de l'équation précédente avec l'aide du site Mie Scattering Calculator[3] qui calcule plusieurs paramètres pour la diffusion de Mie, dont le cosinus moyen de la fonction de phase(g) et la section de diffusion(σ_s).

Pour la molécule fluorescente, nous avons utilisé la rhodamine 6G, dont le spectre d'émission et absorption est démontré dans l'image 4(a). Cette molécule a été utilisée pour montrer une bonne interaction avec la lumière dans le spectre visible et aussi bonne stabilité optique, ce qui la fait une bonne option pour l'utilisation comme milieu à gain.

Ensuite, nous avons calculé τ_D/τ_a pour différentes configurations, dont multiples valeurs de d , L et n ont été vérifiés. En addition, deux types de matériaux ont été vérifiés pour les sphères diélectriques, dont le polystyrène et la silice(SiO_2).

D'abord, nous avons vérifié l'influence de la taille de l'échantillon pour les deux matériaux différents utilisés, ce qui nous a donné la réponse montrée dans l'image 4(b). Comme prévu par l'équation 1, la relation entre τ_D/τ_a est linéaire. D'ailleurs, une variation entre les valeurs possibles a permis une amélioration de 100 fois dans le temps de diffusion. La taille de 1 cm a été choisie pour offrir une bonne valeur pour la relation τ_D/τ_a et aussi pour rendre possible une intensité de lumière de sortie que peut être analysée par le spectroscope. Il est aussi important de surligner que les échantillons de 1 cm de diamètre sont d'achat facile et nous a permis de produire un nombre considérable d'échantillons de même dimension.

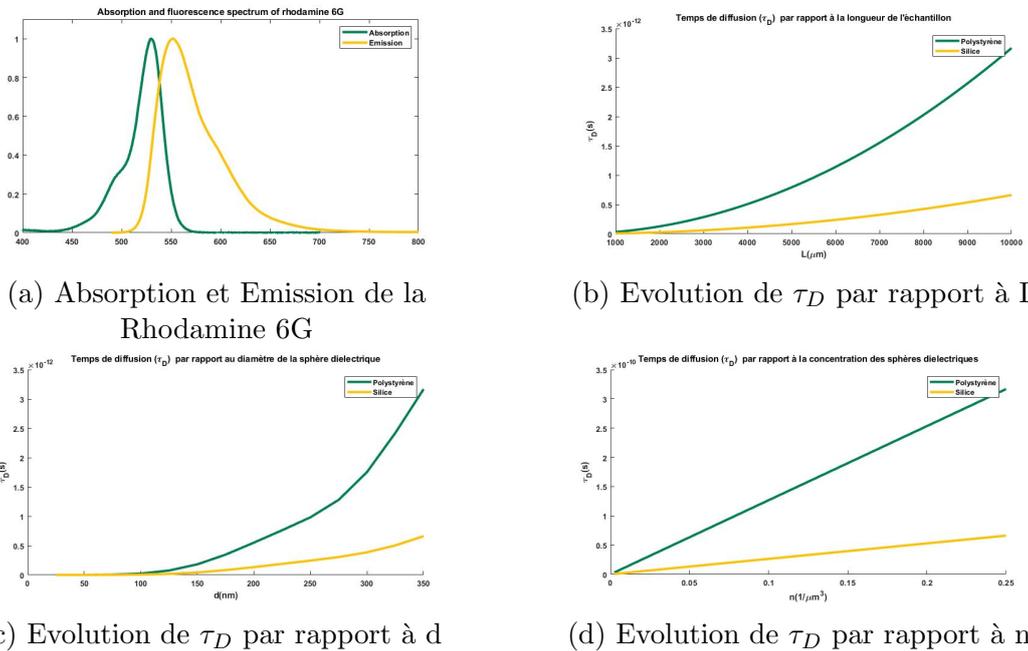


FIGURE 4 – Histogrammes cumulés des tailles

Ensuite, la variation du diamètre des sphères diffuseurs a été aussi calculé, ce qui a donné la réponse démontrée dans l'image 4(c). D'après le résultat, des plus grands diffuseurs peuvent augmenter la relation τ_D/τ_a , toutefois, il est important

d'éviter que la taille du diffuseur soit de la même longueur d'onde pour permettre la diffusion de Mie. Les expériences ont commencé avec des sphères de tailles de 100, 200, 350 nm, toutes inférieures à la longueur d'onde de 500 nm. Enfin, la réponse de chaque matériau pour la variation de la concentration a été aussi vérifié, comme montre L'image 4(d).

L'étape d'optimisation était importante non seulement pour comprendre la réponse du τ_D/τ_a par rapport aux paramètres du système, mais aussi pour réaliser des estimatives des dimensions des diffuseurs nécessaires, bien comme les matériaux le plus intéressants. D'après les résultats précédents, il est visible que le polystyrène donne les meilleures réponses pour toutes les analyses, vu qu'il offre des plus grandes valeurs de τ_D/τ_a .

3.2 Création des échantillons

Pour l'obtention des résultats, deux types d'échantillons ont été produits pendant les expériences. Le premier contient un ensemble d'eau et rhodamine, qui a été utilisé non seulement comme référence, mais aussi pour étudier l'influence de la concentration de la rhodamine dans le spectre d'émission. Pour le seconde, les sphères diffuseurs ont été ajoutés dans la solution pour proportionner la diffusion de la lumière. L'image 5 montre des exemplaires d'échantillons avec une concentration croissante des sphères diffuseurs de droite à gauche, dont il est possible voir la différence de couleur et de diffusion de la lumière dans les liquides.



FIGURE 5 – Exemple des échantillons produits avec des différentes concentrations de sphères diffuseures

3.3 Système optique

Le système optique développé pour l'expérience est démontré ensuite. La figure 6 montre le diagramme de l'expérience, pendant que la figure 7 exhibe le montage optique développé. Comme source de lumière nous avons utilisé un laser pulsé de fréquence de pulsation de 80 kHz et de longueur d'onde de 500 nm, pour que l'excitation soit dans la région d'intersection de l'émission et absorption de la rhodamine 6G montré précédemment. Ensuite, une lente convergente est utilisée pour collimater la lumière d'entrée dans une ouverture circulaire, qui contrôle la taille de la tache circulaire pour la valeur de 1 cm, de façon qu'elle puisse couvrir toute une section

horizontale de l'échantillon. Ensuite, un miroir est utilisé pour diriger le rayon vers l'échantillon et enfin une fibre optique est mise à 90° de la direction du rayon pour capturer le spectre d'émission. Le choix de cet angle a été utilisé pour éviter la saturation du spectromètre par la lumière du laser et favoriser la capture de la lumière émise par la rhodamine.

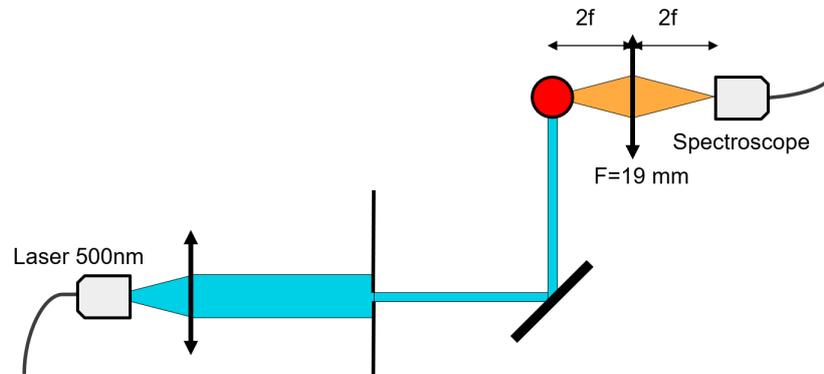


FIGURE 6 – Diagramme du montage optique

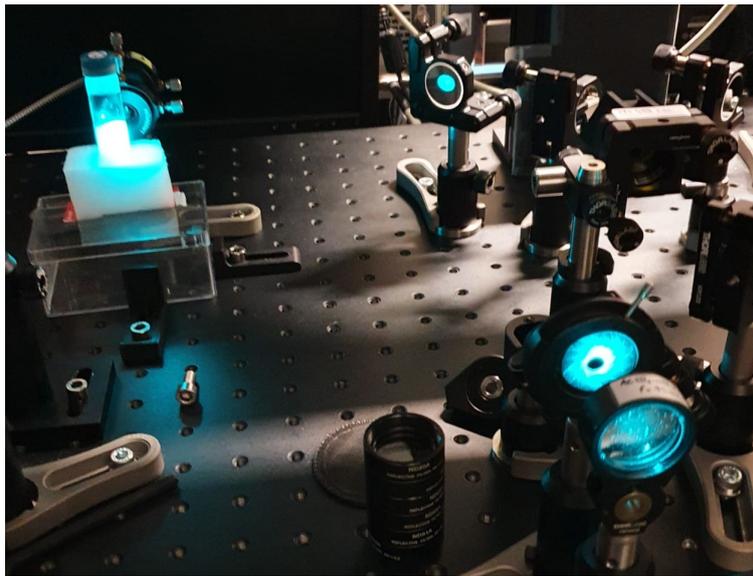


FIGURE 7 – Montage optique développé

3.4 Analyse Spectrale

Après avoir réalisé l'optimisation de l'expérience, les premiers spectres ont été obtenus. Figure 8 montre un spectre générique obtenu pour un échantillon avec la présence de rhodamine et billes diffuseurs.

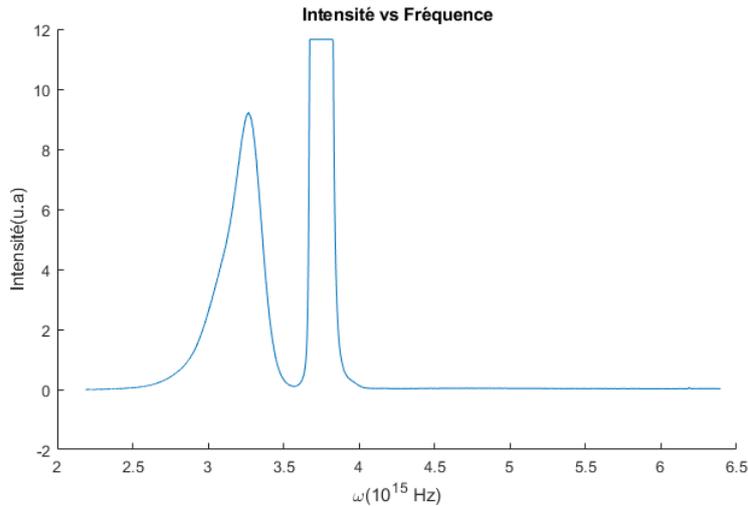


FIGURE 8 – Exemple d'un spectre obtenu

La figure précédente exhibe deux pics. Celui à droite, plus énergétique, représente la lumière laser utilisée pour exciter les molécules de rhodamine et que possède une longueur d'onde vers les 500 nm. Le pic plus à gauche représente l'émission de la rhodamine, moins énergétique, avec une longueur d'onde vers les 560 nm. Pour les prochaines analyses, le spectre sera restreint pour la région de l'émission, vu que c'est notre objet d'étude.

D'autres types de pré-analyses ont été mises en jeu pour améliorer la qualité de notre étude. D'abord, comme tous les spectres ont des intensités très importantes, nous avons utilisé l'échelle log pour rendre possible une visualisation plus précise de la variation d'intensité et forme du spectre. Ensuite, La normalisation des courbes a été aussi utilisée, de façon que les déplacements horizontaux du pic soient plus évidents.

4 Conclusion

En conclusion, nous avons produit une manipulation qui nous permet de vérifier la théorie récemment produite à propos de la thermalisation de photons. L'optimisation des paramètres nous a permis de bien choisir les matériaux et dimensions de notre système, qui est composé surtout par les échantillons et la manipulation optique. Enfin, les spectres obtenus, qui seront démontrés dans la vidéo de présentation, montrent que les résultats semblent être proches de la théorie, ce qui montre que l'expérience menée est prometteuse pour décrire la thermalisation de la lumière.

5 Références

- [1] JILA BEC/Ultracold Atoms Homepage (colorado.edu)
- [2] J.Don Jayamanne,thermalisation de Photons, Institut Langevin, 2021
- [3] Mie Scattering Calculator (https://omlc.org/calc/mie_calc.html)