



**HAL**  
open science

# Couplage entre les lasers solides émettant dans le bleu et les luminophores jaunes pour l'obtention de la lumière blanche pour l'éclairage

Christophe Catalano

► **To cite this version:**

Christophe Catalano. Couplage entre les lasers solides émettant dans le bleu et les luminophores jaunes pour l'obtention de la lumière blanche pour l'éclairage. Plasmas. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2020. Français. NNT : 2020TOU30007 . tel-02972082

**HAL Id: tel-02972082**

**<https://theses.hal.science/tel-02972082>**

Submitted on 20 Oct 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# THÈSE

## En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

---

Présentée et soutenue par  
**Christophe CATALANO**

Le 8 janvier 2020

**couplage entre les lasers solides émettant dans le bleu et les  
luminophores jaunes pour l'obtention de la lumière blanche pour  
l'éclairage.**

---

Ecole doctorale : **GEET - Génie Electrique Electronique et Télécommunications :  
du système au nanosystème**

Spécialité : **Ingénierie des Plasmas**

Unité de recherche :

**LAPLACE - Laboratoire PLAsma et Conversion d'Énergie - CNRS-UPS-INPT**

Thèse dirigée par  
**Georges ZISSIS et Gérald LEDRU**

Jury

**M. Stelios COURIS, Rapporteur**  
**M. Luc CHASSAGNE, Rapporteur**  
**Mme Christelle AUPETIT-BERTHELEMOT, Examinatrice**  
**M. Georges ZISSIS, Directeur de thèse**  
**M. Gérald LEDRU, Co-directeur de thèse**

## Composition du jury :

M. Georges ZISSIS	Université de Toulouse 3 Paul Sabatier	Directeur de thèse
M. Gerald LEDRU	Université de Toulouse 3 Paul Sabatier	Co-directeur de thèse
M. Stelios COURIS	Université de Patras	Rapporteur
M. Luc CHASSAGNE	Université de Versailles	Rapporteur
Mme Christelle AUPETIT- BERTHELEMOT	Université de Limoges	Examinatrice

# Résumé

Actuellement les LEDs représentent une part de plus en plus importante de l'éclairage mondial. Cependant des recherches récentes ont permis de développer une solution encore plus économe en énergie que les LEDs en couplant optiquement des diodes laser à un luminophore. Les diodes laser fonctionnent sur un principe similaire aux LEDs mais permettent d'obtenir une puissance lumineuse plus élevée. A puissance égale, ceci permet d'utiliser moins de diodes laser et donc de grandement réduire la problématique due au réseau de sources lumineuses. Ces diodes laser sont aussi moins sujettes à l'emballement thermique que les LEDs. Cette solution comporte malgré tout quelques défauts : une diode laser demande une dissipation thermique accrue et produit un niveau de lumière bleue plus important en sortie qu'une LED. Le but de ce manuscrit est d'étudier la caractérisation et la modélisation d'un couplage diode laser/luminophore afin de pouvoir définir les axes d'amélioration de cette technologie ainsi que réaliser un modèle expérimental.

**MOTS-CLES – Diode laser, Luminophore, Chromaticité, Diffusion de Mie, LightTools, Efficacité quantique.**

# Abstract

Currently, Light Emitting Diodes or LEDs are an increasingly important part of global lighting. However, recent research has made possible to develop an even more energy efficient solution than LEDs by optically coupling laser diodes to a remote phosphor. Laser diodes operate on a principle similar to LEDs but allow to obtain a higher luminous power. In fact for an equivalent luminous power, this allows to use less laser diodes and thus greatly reduce problems caused by using a network of light sources. Laser diodes are also less prone to thermal runaway than LEDs. However, this solution isn't perfect: a laser diode requires more heat dissipation and produces a higher level of blue light output than an LED. The aim of this manuscript is to study the characterization and the modeling of a diode laser / phosphor coupling in order to be able to define the axes of improvement of this technology as well as to realize an experimental model.

**KEYWORDS**–Laser diode, Phosphor, Chromaticity, Mie scattering, LightTools, Quantic efficiency.

C'est avec un plaisir non dissimulé que je rédige aujourd'hui les traditionnels remerciements de thèse. Réaliser un doctorat est un exercice demandant une grande dose de ténacité et d'adaptabilité, malgré cela je peux vous affirmer que le jeu en vaut la chandelle car il m'apparaît aujourd'hui que j'ai énormément de chance d'avoir pu travailler avec autant de gens de talent durant ce doctorat.

Les travaux rapportés au sein de ce manuscrit furent réalisés au sein du Laboratoire PLAsma et Conversion d'Énergie (LAPLACE) de Toulouse, dans le service Lumière & Matière (LM). Ils furent conjointement réalisés au sein du Department of Electrical and Electronic Engineering, Electrical Energy Conversion Laboratories de Ehime University situé à Matsuyama au Japon. De plus, une partie de ces travaux fut réalisée au sein du laboratoire d'optique et de chimie de la National Central University de Taiwan. Enfin une dernière partie fut réalisée au Technology Campus de l'université de Ku Leuven en Belgique.

Avant toute chose, je tiens à dire que puisque l'ordre d'apparition dans un discours oral ou écrit reflète une certaine hiérarchie dans l'importance accordée à chacun des personnes, dans mon cas, il faudrait TOUS vous placer au rang 1.

Merci à chacun. Sans vous, ce manuscrit n'existerait certainement pas.

Pour commencer, je tiens à remercier infiniment mes deux directeurs de thèse, le professeur Georges Zissis et le maître de conférences Gerald Ledru, pour avoir proposé un sujet aussi intéressant, et surtout pour leur soutien, leur confiance et tout le savoir qu'ils m'ont transmis au cours de ce doctorat.

Je remercie également par ordre chronologique le professeur Masafumi Jinno, le professeur Ching-Cherng Sun ainsi que le professeur Youri Meuret pour m'avoir accueilli au sein de leurs laboratoires afin de m'apporter leur expertise tout au long de cette thèse.

Je remercie vivement Monsieur Hideki Motomura, Monsieur QuangKhoi Nguyen, et Monsieur Antonio Correia pour leur suivi, leur patience, et leur expertise tout au long de mes expériences au sein de leurs laboratoires respectifs.

Tout au long de cette aventure j'ai eu l'occasion de bénéficier de l'aide d'un très grand nombre de personnes. Pour cela je suis reconnaissant envers monsieur Pascal Dupuis, monsieur David Buso, monsieur Marc Ternisien, monsieur Laurent Canale pour avoir répondu présent lorsque j'avais une question, un problème dans la salle de manipulation ou tout simplement pour leur bonne humeur.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Xavier Franceries, pour son investissement, son recul sur mon travail et plus généralement pour son suivi le long de ma thèse.

Plus généralement, je remercie aussi les doctorants (ou docteurs maintenant) qui étaient présents au sein des différents laboratoires : Michael Bressan, Benoit Blondel, Jérémy Dulout, Benjamin Ramos, Ilias Papas, Angel Barroso ou encore Yuuki Isozaki pour leur bonne humeur, les connaissances qu'ils m'ont transmis dans leur domaine respectif ou pour tous les échanges que nous avons eu durant ces années.

Pour terminer, je souhaiterais remercier le professeur Luc Chassagne et le professeur Stelios Couris pour avoir accepté de parcourir et analyser mon travail.

Merci encore pour m'avoir donné cette opportunité.



# Table des matières

Introduction générale.....	18
Chapitre 1 : Etat de l'art de l'éclairage, de la lumière à sa production.....	20
1.1 Introduction.....	20
1.2 Les bases du rayonnement.....	20
1.3 Impacts de la lumière sur l'Homme.....	26
1.4 La fonction visuelle de l'être humain.....	28
1.5 Comment qualifier un flux lumineux :.....	32
1.5.1 Le spectre lumineux.....	32
1.5.2 Le flux lumineux et le flux spectral énergétique.....	34
1.5.3 Température de couleur et coordonnées chromatiques.....	36
1.6 Les principales sources lumineuses artificielles.....	42
1.6.1 Les deux grands phénomènes physiques à l'origine de la création de lumière artificielle.....	43
1.6.2 Les sources à incandescence.....	44
1.6.2.1 La chandelle.....	44
1.6.2.2 L'ampoule à incandescence.....	44
1.6.2.3 La lampe à halogène.....	45
1.6.3 Les sources à luminescence.....	46
1.6.3.1 La lampe fluorescente.....	46
1.6.3.2 Le tube fluorescent.....	47
1.6.3.3 La lampe fluo-compacte.....	48
1.6.3.4 La lampe à vapeur de mercure.....	48
1.6.3.5 Lampe à vapeur de sodium.....	49
1.6.3.6 Lampe à induction.....	50
1.7 L'électroluminescence.....	52
1.7.1 Généralités et historique.....	52
1.7.2 Les diodes électroluminescentes organiques.....	53
1.8 Conclusion.....	54

Chapitre 2 : De l'électroluminescence à la diode laser ainsi que le couplage au luminophore.....	56
2.1 Introduction.....	56
2.2 Les bases des diodes électroluminescentes.....	58
2.3 Les Problématiques liées aux LEDs.....	62
2.3.1 Les principaux matériaux utilisés.....	62
2.3.1.1 Les premières LEDs bleues et leur conception.....	64
2.3.1.2 Les premières LEDs blanches.....	64
2.4 Le laser : des origines aux diodes laser.....	68
2.4.1 Le pompage optique et la création du premier LASER.....	68
2.4.2 La composition d'un laser.....	69
2.4.3 Les conditions d'oscillation laser.....	71
2.4.4 La diode laser.....	72
2.5 Les luminophores.....	74
2.5.1 La photoluminescence.....	74
2.5.1.1 Les matériaux luminescents solides.....	74
2.5.1.2 La photoluminescence moléculaire.....	77
2.5.2 Luminophores basés sur des défauts de structure.....	79
2.5.2.1 Les composés cristallins.....	80
2.5.2.2 Les matériaux amorphes.....	81
2.6 Conclusion.....	86
Chapitre 3 : caractérisation, modélisation et problématiques du couplage diode laser / luminophore.....	88
3.1 Introduction.....	88
3.2 Caractéristiques de la source lumineuse étudiée.....	90
3.3 Modèle de référence et première approche par le contrôle de la lumière bleue.....	92
3.4 Diffusion de Mie et base des modifications du luminophore.....	94
3.5 Etude de la réduction de la lumière bleue.....	96
3.5.1 Impact de l'épaisseur du luminophore.....	96
3.5.2 Impact de la taille des particules du luminophore.....	98
3.5.3 Impact de la densité de particules du luminophore.....	100

3.5.4 Conclusion sur l'atténuation de la lumière bleue par modification du luminophore.....	102
3.6 Validation de l'impact de la concentration du luminophore par l'approche de l'efficacité quantique du luminophore.....	104
3.6.1 Définition de l'efficacité quantique.....	104
3.6.2 L'efficacité quantique dans l'industrie actuelle.....	105
3.6.3 Banc de mesure de l'efficacité quantique.....	105
3.6.4 Méthode de calcul de l'efficacité quantique.....	109
3.6.5 Méthode de mesure et d'optimisation.....	111
3.6.6 Mesure de l'efficacité quantique en fonction de la concentration du luminophore.....	115
3.6.7 Modélisation du luminophore par l'approche de l'efficacité quantique.....	117
3.7 Conclusion.....	120
Chapitre 4 : Approche expérimentale, choix d'un couple diode laser / luminophore et application d'un exemple précis.....	122
4.1 Introduction.....	122
4.2 Dispositif expérimental.....	124
4.2.1 La source lumineuse.....	124
4.2.2 L'alimentation de la diode laser.....	125
4.2.3 Dissipation thermique par module Peltier : principe.....	126
4.2.4 Appareil de mesure : spectromètre.....	128
4.3 Mesures et résultats expérimentaux.....	130
4.3.1 Spécifications et cahier des charges.....	130
4.3.2 Luminophores expérimentaux NCU Taiwan.....	132
4.3.3 Luminophores industriels Phosphor Tech.....	135
4.3.4 Luminophores Intematix.....	138
4.3.5 Synthèse des résultats.....	143
4.4 Conclusion.....	146
Conclusion générale.....	148
Annexes.....	158
1. Les origines du laser : l'expérience des fentes de Young.....	158
2. De la théorie ondulatoire aux premiers MASER.....	160



# Table des figures

Figure 1 : Le spectre électromagnétique [5]

Figure 2 : Transmission d'énergie lors d'une collision [7]

Figure 3 : Illustration du rythme circadien lié au sommeil [8]

Figure 4 : Coupe de l'œil

Figure 5 : Observation d'une coupe colorée de rétine (X 400) et schéma de la structure de la rétine [23]

Figure 6 : Densité des photorécepteurs de la rétine humaine [24]

Figure 7 : Principe de détection chimique de la lumière par l'œil humain [26]

Figure 8 : Spectre de la lumière solaire [27]

Figure 9 : Spectre typique de la lumière naturelle reçue au sol [28]

Figure 10a : Spectre typique d'une lampe incandescente ou issue d'une bougie [28]

Figure 10b : Spectre typique d'une lampe fluorescente [28]

Figure 10c : Spectre typique d'une LED froide [28]

Figure 10d : Spectre typique d'une LED chaude [28]

Figure 11 : Fonctions d'efficacités lumineuses spectrales diurne (photopique) et nocturne (scotopique) en fonction des longueurs d'ondes

Figure 12 : Triangle des couleurs comprenant la zone du « corps noir »

Figure 13 : Description de la théorie des corps noirs

Figure 14 : Température de couleur proximale

Figure 15 : Principales méthodes de production de lumière

Figure 16 : Chandelle en cire d'abeille

Figure 17 : composition d'une ampoule à incandescence

Figure 18 : Lampe à halogène

Figure 19 : principe de combinaison du tungstène

Figure 20 : principe de fluorescence et de phosphorescence

Figure 21 : Tube fluorescent en fonctionnement

Figure 22 : création de lumière dans un tube fluorescent

Figure 23 : Lampe fluo-compacte spirale

Figure 24 : composition d'une lampe à vapeur de mercure

Figure 25 : lampe à vapeur de sodium stabilisée

Figure 26 : composition d'une lampe à induction

Figure 27 : Architecture d'une OLED

Figure 28 : Jonction PN d'une diode [56].

Figure 29 : Jonction PN d'une LED [56].

Figure 30 : nature des matériaux [59].

Figure 31 : Diagramme énergétique en fonction du vecteur d'onde  $k$  pour un matériau à gap indirect (a) et à gap direct (b) [63].

Figure 32 : LED blanches constituées d'un semi-conducteur bleu et d'un luminophore convertissant une partie du bleu en vert, jaunes et rouge [72].

Figure 33 : spectre d'émission d'une LED en fonction de l'absorption du luminophore [75].

Figure 34 : Pompage optique de différents lasers [82].

Figure 35 : cavité optique en anneau [84].

Figure 36 : géométrie du faisceau dans la cavité laser [84].

Figure 37 : structure d'une diode laser [87].

Figure 38 : niveau d'énergie dans un isolant [89].

Figure 39 : schéma de différentes voies d'excitation d'un centre luminescent [89].

Figure 40 : diagramme de Perrin-Jablonski [95].

Figure 41 : Schéma des niveaux d'énergie de l'ion  $Ce^{3+}$  dans une matrice de YAG et spectre d'émission du YAG :  $Ce^{3+}$  pour une longueur d'onde d'excitation de 460 nm [96].

Figure 42 : Schéma des niveaux d'énergie de l'ion  $Eu^{3+}$  dans une matrice vanadate et spectre d'émission du  $GdVO_4$  :  $Eu^{3+}$  pour une longueur d'onde d'excitation de 330 nm [97].

Figure 43 : Schéma des centres luminescents dans la silice vitreuse [104].

Figure 44 : changement de perception d'un environnement en fonction de la température de couleur de la source lumineuse [113].

Figure 45 : illustration de la notion d'indice de rendu des couleurs.

Figure 46 : modèle de base de la source sur LightTools

Figure 47 : couleur et éclairage obtenus dans le cas du luminophore de référence.

Figure 48 : spectre obtenu pour le luminophore de référence.

Figure 49 : De gauche à droite : intensité de la diffusion Rayleigh, de la diffusion Mie pour de petites particules et de la diffusion Mie pour de grosses particules, en fonction de la direction. L'onde incidente arrivant par la gauche [117].

Figure 50 : luminophore « cible » modélisé sur LightTools.

Figure 51 : profil du luminophore dit « cône » dont seule l'épaisseur varie.

Figure 52 : Comparaison de la puissance optique de référence (à gauche) avec celle du luminophore « cône » (à droite) [ $\text{W}/\text{mm}^2$ ].

Figure 53 : densité de puissance totale et de la lumière bleue pour le luminophore « cône ».

Figure 54 : rayon des particules du luminophore R en nm, pour chaque couche de la « cible » Y.

Figure 55 : Comparaison de la puissance optique de référence (à gauche) avec celle du dispositif à gradient de taille des particules (à droite) [ $\text{W}/\text{mm}^2$ ].

Figure 56 : densité de puissance totale et de la lumière bleue pour le dispositif à gradient de taille des particules.

Figure 57 : densité de particule du luminophore D pour chaque couche Y de la « cible ».

Figure 58 : Comparaison de la puissance optique de référence (à gauche) avec celle du dispositif à gradient de densité des particules (à droite) [ $\text{W}/\text{mm}^2$ ].

Figure 59 : densité de puissance totale et de la lumière bleue pour le dispositif à gradient de densité de particule.

Figure 60 : mesure de l'efficacité quantique d'un luminophore YAG créé en laboratoire pour différentes longueurs d'onde en nm.

Figure 61 : Banc de mesure de l'efficacité quantique d'un luminophore.

Figure 62 : Puissance spectrale de sortie du laser superK de Fianium.

Figure 63 : monochromateur varia 16 de NKT Photonics et logiciel de commande.

Figure 64 : Monochromateur TMc300 de Bentham et parcours interne du rayonnement lumineux.

Figure 65 : sphère intégrante LMS-100.

Figure 66 : Rendement quantique pour les photodétecteurs iDus 420.

Figure 67 : spectre obtenu pour un luminophore YAG 20%.

Figure 68 : spectres de référence et du luminophore pour le YAG 20%.

Figure 69 : partie du spectre utilisé, pour le calcul de  $N_v$  à gauche et pour le calcul de  $N_e$  à droite.

Figure 70 : efficacité quantique d'un luminophore solide YAG 10%.

Figure 71 : luminophores expérimentaux solides.

Figure 72 : échantillon de référence du luminophore liquide.

Figure 73 : efficacité quantique pour un luminophore YAG 10% premiers résultats.

Figure 74 : décalage du pic laser mesuré avec un intervalle de 5nm.

Figure 75 : spectres obtenus pour une longueur d'onde éloignée de la valeur optimale.

Figure 76 : spectre utilisé pour le calcul de l'absorption et de l'émission du luminophore YAG 1%.

Figure 77 : spectre utilisé pour le calcul de l'absorption et de l'émission du luminophore YAG 20%.

Figure 78 : efficacité quantique obtenue pour les deux luminophores YAG 1% et YAG 20%.

Figure 79 : modèle du banc de mesure de l'efficacité quantique.

Figure 80 : efficacité quantique en fonction de la concentration de YAG au sein du luminophore pour des longueurs d'ondes situées entre 450 nm et 490 nm, modèle LightTools.

Figure 81 : source expérimentale composée d'une diode laser et d'un luminophore déporté.

Figure 82 : Keithley K2602A.

Figure 83 : Interface de contrôle du Keithley sous LabVIEW.

Figure 84 : principe du module Peltier.

Figure 85 : diode laser intégrée au module Peltier.

Figure 86 : Spectromètre Specbos 1201.

Figure 87 : exemple de résultat de mesure des coordonnées chromatiques grâce au Specbos 1201 et spectre correspondant.

Figure 88 : température de couleurs usuelles dans plusieurs types d'intérieurs [121].

Figure 89 : exemple de luminaire de bloc opératoire [122].

Figure 90 : Luminophore créés à la NCU de Taiwan.

Figure 91 : spectres d'émission des différents luminophores réalisés à Taiwan en  $W/(sr.m^2)$  par nm.

Figure 92 : spectre obtenu pour le couplage de la diode laser avec le luminophore Green YAG 10% en  $W/(sr.m^2)$  par nm.

Figure 93 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore Green YAG 10% en fonction du courant nominal en Ampère.

Figure 94 : feuille de luminophore Phosphor Tech 5500K-96 encapsulé dans deux plaques de verre transparentes.

Figure 95 : spectre obtenu pour le couplage de la diode laser avec le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en  $W/(sr.m^2)$  par nm.

Figure 96 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en fonction du courant nominal en Ampère.

Figure 97 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en fonction du courant nominal en Ampère dans le cas d'une encapsulation du luminophore par quartz ou par verre.

Figure 98 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en fonction du courant nominal en Ampère dans le cas d'une encapsulation du luminophore par quartz.

Figure 99 : Luminophore « chromalit » proposé par Intematix.

Figure 100 : spectre obtenu pour le couplage de la diode laser avec le luminophore CL-930 d'Intematix en  $W/(sr.m^2)$  par nm.

Figure 101 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore CL-930 d'Intematix en fonction du courant nominal en Ampère.

Figure 102 : ellipse de valeurs acceptables définies par le client pour une température de couleur de 5000 K.

Figure 103 : exemple d'ellipses de Macadam ainsi que la variation de leur taille en fonction de la couleur, chaque ellipse étant grossie d'un facteur 10.

Figure 104 : Coordonnées obtenues dans le domaine XYZ en fonction du courant, pour le luminophore CL-930 d'Intematix, normalisées et comparées à l'ellipse de Macadam correspondante.

Figure 105 : distance de Mahalanobis entre les valeurs mesurées pour chaque valeur de courant, en bleu, par rapport au centre de l'ellipse.

Figure 106 : couleurs test utilisé pour caractériser le rendu des couleurs d'une source lumineuse [124].

Figure 107 : expérience des fentes de Young.

Figure 108 : représentation de deux niveaux d'énergie d'un atome.

Figure 109 : interaction par absorption.

Figure 110 : interaction par émission spontanée.

Figure 111 : interaction par émission stimulée.

Figure 112 : Principe de fonctionnement du premier MASER à ammoniac.



# Table des tableaux

Tableau 1 : Les différentes ondes et leurs longueurs d'onde associées [6].

Tableau 2 : Efficacité lumineuse spectrale relative,  $V(\lambda)$ , en vision photopique [30].

Tableau 3 : Largeurs de bande interdite, ou gap, à 0 K [62].

Tableau 4 : Lien entre le type de matériau utilisé et la couleur émise par la LED [64].

Tableau 5 : Exemples de composés amorphes luminescents [112].

Tableau 6 : différents luminophores proposés par Intematix.

Tableau 7 : indice de rendu des couleurs pour chaque couleur test mesuré pour chaque luminophore avec un courant nominal de 0,8A.

Tableau 8 : avantage et inconvénients de chaque source par rapport aux autres.



# Introduction générale

Chaque jour sur la planète environ 33 milliards de lampes sont en service et consomment 20% [1] de l'énergie électrique produite. Cette consommation correspond à 3 140 TWh par année. Cette énergie pollue l'environnement terrestre. En particulier, l'éclairage est indirectement responsable du relâchement de 1,5 Millions de tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère [2].

Actuellement le parc d'éclairage français regroupe pas moins de 9 millions de sources lumineuses rien que pour l'éclairage extérieur, correspondant à 1 260 MW de puissance équivalente. De plus ces installations s'avèrent pour l'instant majoritairement obsolètes. En effet plus de la moitié restent composée de sources énergivores : boules diffusantes, lampes à vapeur de mercure. De plus 40% de ces installations comportent des technologies de plus d'un quart de siècle ou ne correspondent plus aux normes actuelles.

Le but de l'éclairage artificiel étant de pallier au manque de soleil, trois usages principaux de celui-ci se dégagent : l'éclairage intérieur, dans les locaux ou domiciles, l'éclairage externe dit « éclairage sur la voie publique » et enfin le nomade accompagnant tout déplacement où il s'avère nécessaire. Bien que la fonction primaire de ces sources lumineuses soit l'éclairage avec le temps celle-ci s'est vu liée à diverses problématiques environnementales sanitaires ou économiques. Ainsi de nouvelles normes de sécurité, d'ambiance lumineuse, de confort visuel et même de performance et de directivité lumineuse sont venues s'ajouter aux contraintes déjà inhérentes à l'éclairage.

Il existe actuellement 3 technologies de lampe sur le marché de l'éclairage intérieur : La lampe à incandescence, technologie la plus ancienne, fêtant bientôt ses 140 bougies, reste la technologie la plus énergivore et bénéficie du rendement le plus faible. En effet celle-ci convertit environ 95% de l'énergie consommée en chaleur et donc seulement 5% est utilisée pour la création de lumière. Pour des raisons historiques, elle reste largement utilisée même si les dernières lois veillent, à terme, à sa disparition pure et simple.

La lampe fluo-compacte à basse consommation est une amélioration de la technologie utilisée dans les lampes à vapeur de mercure. Celle-ci à l'avantage d'être 4 à 5 fois plus efficace que la lampe à incandescence en plus de réduire les risques dus à la production de chaleur de celle-ci. Elle constitue donc une alternative intéressante au niveau des économies d'énergie mais représente un risque de pollution accru du fait du mercure qui la compose et qui nécessite un système de recyclage extrêmement spécifique. Elle s'avère aussi peu adaptée à certains contextes intérieurs principalement à cause de sa fragilité au choc, ainsi que le risque pour la santé des personnes alentour du fait de sa composition, et de sa faiblesse aux allumages et extinctions répétés ceux-ci réduisant drastiquement sa durée de vie.

Les diodes électroluminescentes, ou LEDs, sont apparues sur le marché en 2006. En plus d'être plus flexibles d'utilisation que les technologies précédentes leur principal atout vient de leur consommation, celle-ci étant bien inférieure à celle des sources existantes. De plus leur durée de vie est elle aussi bien plus longue : 1000h pour une lampe à incandescence contre 20 000h à 50 000h pour une lampe à LED [4]. Enfin leur efficacité lumineuse est également supérieure : leur rendement de conversion lumineux atteint 100 lm/W à comparer aux 16 lm/W des

ampoules à incandescence. Cependant les LEDs ne sont pas exempt de défauts, elles sont très sensible à l'emballement thermique en plus d'être limitées au niveau de la puissance optique maximale. Ces problèmes rendent l'utilisation de LEDs délicate pour obtenir un fort niveau d'éclairage ceci résultant par l'emploi d'un réseau de LED pour obtenir des résultats concluants.

Des recherches récentes ont permis de développer une solution encore plus économe en énergie que les LEDs en couplant optiquement des diodes laser à un luminophore. Les diodes laser fonctionnent sur un principe similaire aux LEDs mais permettent d'obtenir une puissance lumineuse plus élevée. Dans ce cas, le luminophore est déporté afin de réduire l'impact de la puissance du laser sur celui-ci. Cette association présente une température de couleur et des coordonnées chromatiques plus stables que précédemment. Ces diodes laser sont aussi moins sujettes à l'emballement thermique que les LEDs. A puissance lumineuse fixée, ceci permet d'utiliser moins de diodes laser et donc de grandement réduire la problématique due au réseau de sources lumineuses.

Cette solution comporte malgré tout quelques défauts : une diode laser demande une dissipation thermique accrue et produit un niveau de lumière bleue plus important en sortie qu'une LED. De plus cette technologie étant récente, il y a actuellement peu de luminophores adaptés sur le marché. Sachant cela le groupe Lumière et Matière (laboratoire LAPLACE) de Toulouse a décidé, conjointement avec le groupe de Masafumi Jinno (université d'EHIME) de Matsuyama au Japon, d'étudier la création d'une source de lumière blanche par l'association d'une diode laser et d'un luminophore adapté dans le but de réduire au maximum l'impact de ces effets, ce qui a donné lieu à ces recherches.

Ce manuscrit est constitué de 4 parties distinctes. Le premier chapitre traitera de l'état de l'art du domaine de l'éclairage, de la nature de la lumière aux méthodes de production de celle-ci en passant par les grandeurs nécessaires à sa caractérisation. Le second chapitre se concentrera sur la source laser, en partant de la LED jusqu'à l'effet laser et sa caractérisation. De plus ce chapitre traitera aussi du luminophore, en particulier la composition principale ainsi que l'effet de celui-ci sur les propriétés lumineuses. Le troisième chapitre traitera de la modélisation du couple diode laser/luminophore ainsi que des modifications à apporter pour optimiser celui-ci. Enfin le dernier chapitre portera sur la réalisation d'un prototype ainsi que son analyse.

# Chapitre 1 : Etat de l'art de l'éclairage, de la lumière à sa production.

## 1.1 Introduction

En premier lieu, avant de montrer la méthodologie appliquée pour ces travaux, il semble nécessaire d'effectuer ici un état de l'art sur les études des phénomènes lumineux, la création de lumière artificielle ainsi que les diverses notions de physique nécessaire pour la compréhension des résultats exposés dans ce document. La lumière est une chose intrinsèquement liée à l'Homme tant elle l'accompagne depuis son premier jour sur terre. Malgré cela, il faudra une longue période avant que celui-ci face une réelle étude la concernant. Une fois celle-ci initiée, de grands scientifiques, tels que Joseph Swan, James Clerk Maxwell ou d'autres tels que Albert Einstein ont pu apporter leur contribution. Tout le long de l'amélioration de sa compréhension, la lumière s'est révélée n'être qu'une infime partie de ce qui s'avère être le spectre électromagnétique. Les études qui suivirent donneront naissance à deux nouvelles sciences majeures : la radiométrie, pour tous les rayonnements non visibles par l'Homme et la photométrie pour le spectre visible. Pour pouvoir la reproduire, la lumière fut générée dans un premier temps par combustion pour ensuite être créée par phénomène électrique dans un réceptacle adapté : l'ampoule. Ensuite, tout s'est accéléré, l'incandescence a laissé place à l'émission de lumière dans un gaz avant d'arriver aujourd'hui à la génération de photon dans un matériau solide.

## 1.2 Les bases du rayonnement

La lumière fait donc partie des phénomènes de rayonnements électromagnétiques, ceux-ci véhiculant de l'énergie à travers l'espace environnant.

Il existe une dualité sur le comportement physique de ces phénomènes électromagnétiques ou la lumière peut être étudiée par ses aspects ondulatoires ou corpusculaires selon le cas observé. La première théorie complète de la lumière a été établie par le physicien néerlandais Christian Huygens au cours du XVII<sup>e</sup> siècle. Celui-ci s'est concentré sur l'aspect ondulatoire de la lumière et a en particulier démontré que les ondes lumineuses pouvaient interférer jusqu'à former un front d'onde se propageant en ligne droite. Cependant cette théorie ne pouvait expliquer certains phénomènes lumineux, elle fut donc éclipsée par la théorie corpusculaire de la lumière établie en suivant par Isaac Newton. Ce physicien pensait la lumière composée de corpuscules, ce qui permettait d'expliquer simplement les phénomènes de réflexion optique. En poussant cette théorie dans ses retranchements, elle pouvait également expliquer les phénomènes de réfraction à travers une lentille et de dispersion d'un faisceau lumineux au travers d'un prisme.

Ce fut seulement au début du XIXe siècle lors de l'expérience des fentes de Young, réalisées par Thomas Young et Augustin Fresnel pour étudier la diffraction, que la pertinence des théories de Christian Huygens refit surface. En effet cette expérience prouve une similitude entre le motif d'interférence observé lors de la diffraction de la lumière avec les interférences d'ondulation sur l'eau. La longueur d'onde de la lumière pouvant même être calculée grâce à ces motifs.

La vision ondulatoire de la lumière s'est alors réimposée peu à peu au sein de la communauté scientifique au cours du XIXe, surtout grâce à l'explication en 1821 par Augustin Fresnel du phénomène de polarisation de la lumière impossible à appréhender par approche corpusculaire. A la suite de l'expérience de Léon Foucault sur la vitesse de propagation de la lumière en 1850, les équations proposées par Huygens furent confirmées par de multiples expériences imposant alors la vision ondulatoire comme vision principale. Dans la seconde moitié du XIXe siècle, James Clerk Maxwell représenta la lumière comme une propagation d'ondes électromagnétiques synthétisée dans des équations connues aujourd'hui sous le nom d'équation de Maxwell. Le débat ondes/corpuscule s'est ré-ouvert en 1905 lorsqu'Albert Einstein utilisa le concept de particules de lumière, mis en évidence par l'effet photoélectrique, pour appuyer l'aspect corpusculaire de la lumière. Il utilisa ensuite la notion de quanta d'énergie, initialement introduite par Max Planck en 1900, pour appuyer sa théorie sur l'émission d'un corps noir. Einstein a ainsi démontré que ce phénomène était provoqué par l'absorption de photons, nommés quanta, lors de l'interaction du matériau avec la lumière.

Aucune de ces deux visions ne pouvant être totalement écartée vu qu'elles représentent qu'une partie du phénomène lumineux global. Il a été conclu que ces deux points de vue représentaient plus une analogie d'un comportement partiel plutôt qu'une vision totale. De la même manière, un espace en deux dimensions ne peut parfaitement représenter un objet en 3 dimensions (un cylindre par exemple deviendra, lors du passage en 2 dimensions, à la fois un rectangle, un cercle ou une figure abstraite selon l'angle observé). Ces bases ont donné naissance à la théorie dite de dualité onde-corpuscule de la lumière qui servira par la suite de pilier fondateur de la mécanique quantique. Ainsi étant donné que l'appréhension exacte, à notre échelle, des comportements lumineux soit impossible, les choix de l'angle d'étude, tout comme les équations associées, seront déterminés par l'approche corpusculaire ou ondulatoire donnée par les conditions expérimentales.

Dans le cas de l'approche ondulatoire de la lumière, cette dernière est considérée comme un rayonnement composée d'un ensemble de radiations, celles-ci visibles par l'Homme si situées entre 380 nm et 780 nm de longueur d'onde, cette plage est appelée spectre visible. Chaque radiation composant ce spectre peut être caractérisée par un phénomène périodique de période (T) et de longueur d'onde ( $\lambda$ ). Ensuite en définissant la grandeur c comme la célérité de la lumière dans le vide, 299 792 km/s il est possible de lier la période à la longueur d'onde par la formule suivante :

$$1.1 \quad \lambda = cT$$

Historiquement, les premières longueurs d'ondes mesurables furent dans le spectre visible du fait que c'était les seules mesurables à cette époque. En effet notre vision résulte d'une détection spécifique du spectre électromagnétique, située entre 380 nm et 780 nm, correspondant à la partie sensible de l'œil humain. C'est cette partie du spectre, dit spectre visible qui constitue la lumière (Figure 1). Sur terre celle-ci est majoritairement produite par le soleil ou les étoiles en vision directe ou par la lune, le ciel et même les nuages en vision indirecte (absorption ou réflexion). Malgré cela le spectre électromagnétique du soleil comporte bien plus de longueur d'ondes que le spectre visible par l'être humain.

Avec l'évolution des instruments de mesure, la composition du spectre solaire fut complétée avec tout d'abord la découverte des Infrarouges en 1800 par Williams Herschell puis la découverte des ultraviolets en 1801 par Johann Wilhelm Ritter. Aujourd'hui, il est possible de mettre en évidence des phénomènes lumineux variés allant des rayonnements cosmiques aux ondes radioélectriques. La figure et le tableau suivant montrent la composition connue actuellement du spectre électromagnétique.

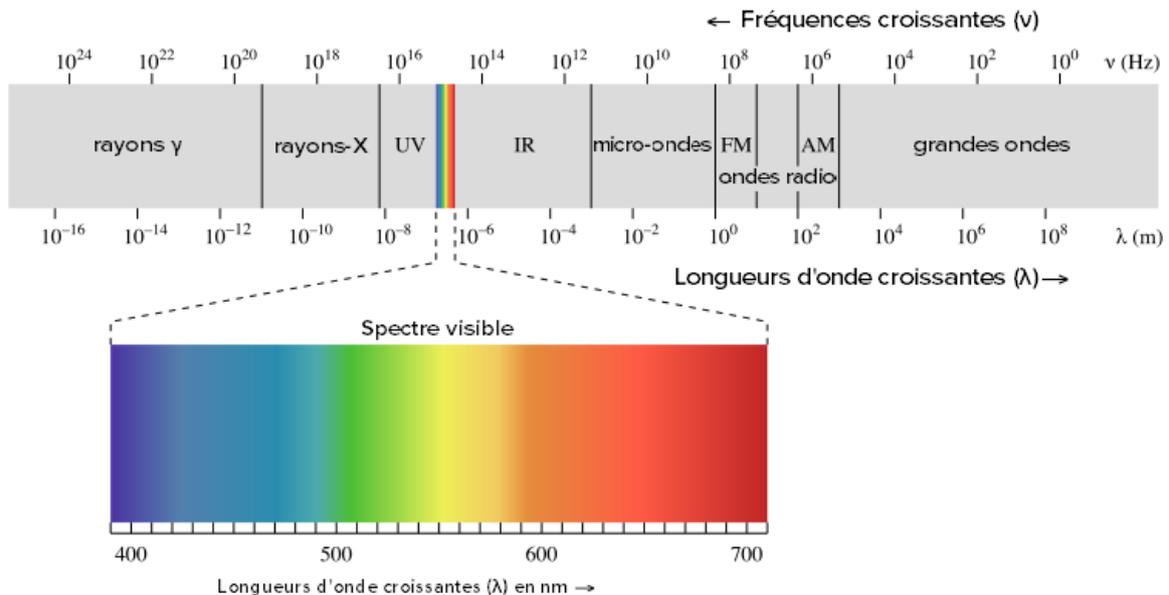


Figure 1 : Le spectre électromagnétique [5].

Intervalles	Longueur d'onde (m)
Ondes radios	$10^3 > \lambda > 1$
Micro-ondes	$1 > \lambda > 10^{-3}$
Infrarouge	$10^{-3} > \lambda > 10^{-7}$
<b>Visible</b>	$7.10^{-7} > \lambda > 4.10^{-7}$
Ultraviolet	$4.10^{-7} > \lambda > 10^{-9}$
Rayons X	$10^{-9} > \lambda > 10^{-11}$
Rayons $\gamma$	$10^{-11} > \lambda > 10^{-13}$

Tableau 1 : Les différentes ondes et leurs longueurs d'onde associées [6].

Le second cas possible concerne l'approche corpusculaire de la lumière. Dans cette vision, la lumière n'est plus une onde qui se propage mais une succession de quanta d'énergie, elle est donc discontinue. Cette théorie considère que le rayonnement est composé de particules nommées « photons », vecteur d'une quantité d'énergie. Lorsqu'un photon percute un électron il se produit une collision dite élastique. Après celle-ci, le photon voit son énergie se transmettre à l'électron tel qu'illustré dans la figure 2.

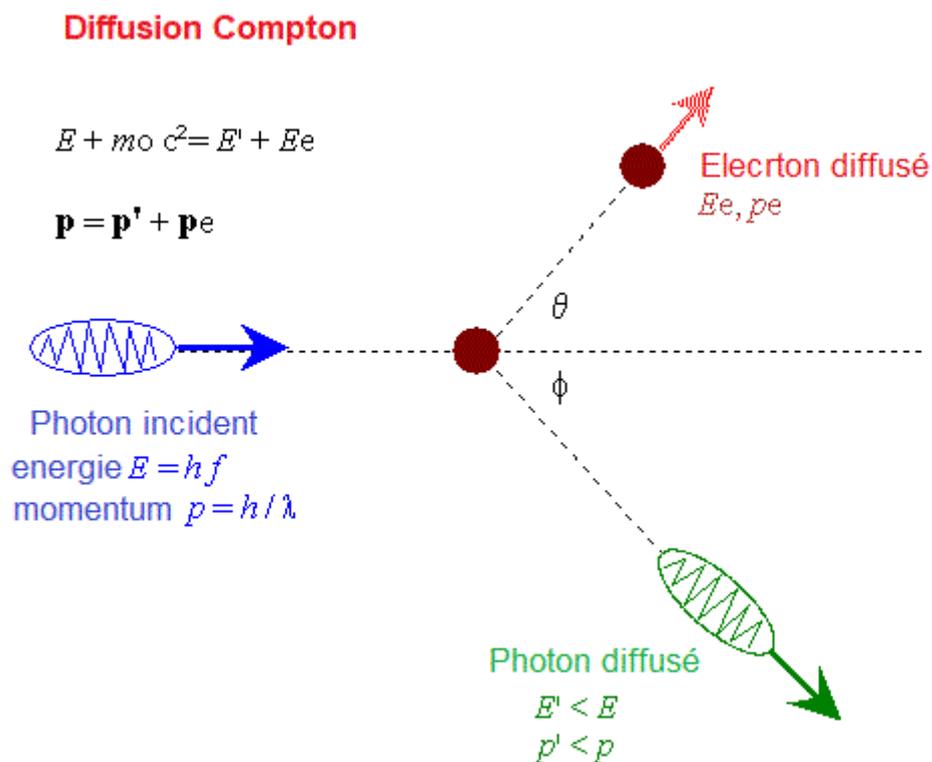


Figure 2 : Transmission d'énergie lors d'une collision [7].

Par la suite Albert Einstein démontra que la fréquence du rayonnement  $\nu$  est liée à l'énergie  $E$  par la relation de Planck :

$$1.2 \quad E = h\nu$$

$$1.3 \quad \text{Avec } \nu = c/\lambda$$

$h$  correspond à la constante de Planck ( $6.626^{-34}$  J.s),  $c$  correspond à la célérité de la lumière dans le vide, environ  $3.10^8$  m/s et  $\lambda$  est la longueur d'onde de la radiation. Cette équation montre que les photons ayant de courtes longueurs d'ondes sont beaucoup plus énergétiques que ceux ayant des longueurs d'ondes plus importantes. Pendant longtemps ces aspects n'ont pas réellement été exploités pour la création des premières sources lumineuses notamment l'incandescence. Cependant, depuis la découverte de la création de lumière par utilisation des matériaux semi-conducteurs il peut être judicieux de sélectionner et d'optimiser ce phénomène pour certaines longueurs d'ondes spécifiques du spectre visible.

Avant de rappeler les bases du phénomène d'électroluminescence il paraît important de bien comprendre l'impact de l'environnement lumineux sur le corps humain et le fonctionnement de l'organe visuel humain, celui-ci servant de référence par la suite pour la caractérisation des sources lumineuses artificielles. Ces deux aspects seront développés dans les deux paragraphes suivants, représentant la synthèse nécessaire pour la prise en compte des contraintes liées à l'œil humain.



## 1.3 Impacts de la lumière sur l'Homme

La lumière influence l'Homme sur plusieurs niveaux distincts. Du point de vue physiologique, elle est considérée comme source de vie par de nombreuses espèces végétales ou animales dont l'espèce humaine. Elle est étroitement liée aux rythmes biologiques humains et notamment les rythmes circadiens comme celui du sommeil illustré en figure 4 ci-dessous, sa présence ou son absence dictant le métabolisme humain.

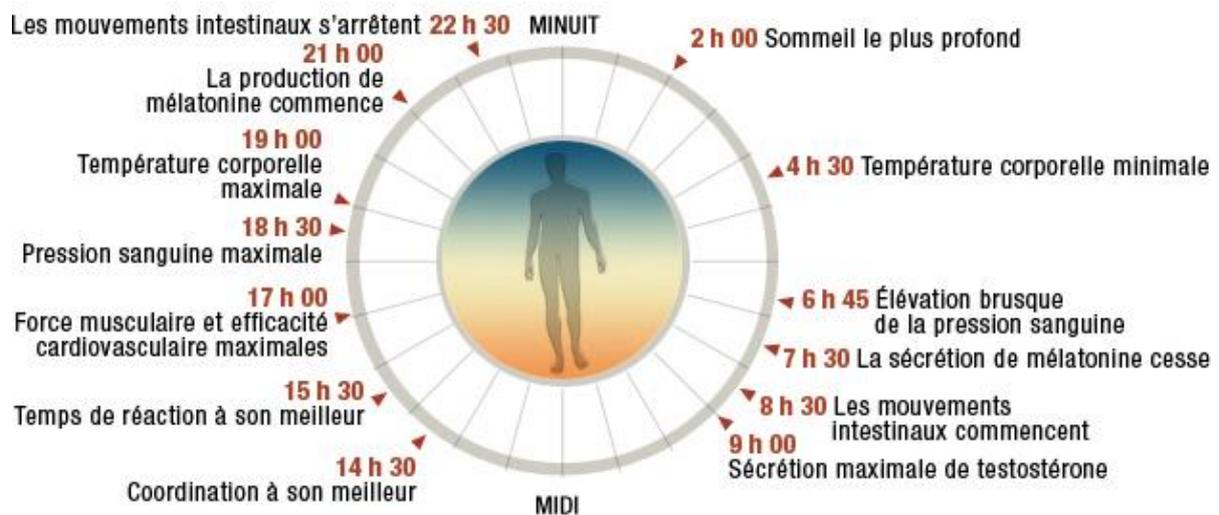


Figure 3 : Illustration du rythme circadien lié au sommeil [8].

Ces rythmes circadiens sont décrits comme étant endogènes par le corps médical [9], c'est-à-dire qu'ils sont générés à l'intérieur du corps humain par un mécanisme temporel interne nommé horloge circadienne. Malgré tout, plusieurs d'entre eux, comme la température corporelle, le rythme du sommeil, le rythme cardiaque, les niveaux d'éveil et de vigilance ainsi que l'humeur ou la mémoire peuvent être influencés par la luminosité ambiante.

Pour l'humain, la période de chaque cycle est légèrement supérieure à 24 heures, amenant jusqu'à une heure de décalage au bout de 5 jours selon certaines études [10]. La lumière permet en temps normal de supprimer ce décalage. En effet, pour chaque jour, la luminosité naturelle de l'environnement transmise grâce à la rétine aux deux noyaux supra-chiasmatiques via des connexions neuronales directes permet de remettre l'horloge circadienne à l'heure terrestre [11]. Par exemple, l'exposition à une forte lumière en fin de soirée retarde les rythmes circadiens entraînant un endormissement, et donc un réveil, retardé. D'un autre côté si cette exposition est réalisée tôt le matin elle avance les rythmes circadiens et permet un endormissement et un réveil en avance par rapport à la normale.

Du point de vue psychologique, l'impact de la lumière sur l'humeur de l'être humain a été démontré comme non négligeable que celle-ci soit naturelle ou artificielle. Elle agit par exemple sur la notion de sentiment de sécurité de l'Homme dans son environnement. Par exemple une étude réalisée par l'université de Grenade, grâce à un panel de 270 personnes, démontre l'impact positif de l'éclairage sur les piétons en milieu urbain [12]. Bien que prémunir les agressions ou les cambriolages soit difficile voire impossible, la qualité de l'éclairage extérieur semble diminuer leurs récurrences. L'Association Française de l'Eclairage (AFE) a noté que des pays comme la Belgique ou les Etats Unis d'Amérique voyaient leur délinquance urbaine augmenter en cas de coupure d'éclairage public [13]. Malgré cela il est important de rappeler que l'impact de l'éclairage urbain est surtout dissuasif.

D'un point de vue artistique, la lumière apporte aussi un regard différent sur certaines œuvres architecturales ou picturales selon la matière utilisée. Dès 1923, l'architecte Le Corbusier défendait une philosophie allant en ce sens dans son ouvrage sur l'architecture : "L'architecture est le jeu savant, correct et magnifique des volumes assemblés sous la lumière" et "Les éléments architecturaux sont la lumière et l'ombre, le mur et l'espace" [14]. Dans ce cas, la lumière est considérée comme une part primordiale de toute conception architecturale. La lumière artificielle à l'avantage de plus d'apporter une nouvelle vision par apport à la lumière naturelle car elle est contrôlable et adaptable à l'envie. Cela permet une mise en valeur architecturale privilégiée par les architectes [15].

Du fait des raisons précédentes, la qualité lumineuse d'une source sera à contrôler à tout prix [16]. En effet, un éclairage blanc sera plus rassurant pour l'organisme humain qu'un éclairage jaunâtre, type lampe à sodium [17]. La perception étant un sens prépondérant pour l'être humain, il faudra judicieusement contrôler la qualité de l'ambiance lumineuse des environnements de travail ou de repos par exemple [18]. Ainsi ce contrôle, ou son absence, aura des conséquences, positives ou négatives, plus ou moins attendues sur l'organisme. Une lumière trop intense engendrera par exemple des éblouissements ou des difficultés pour discerner un document écrit ou numérique. Un éclairage dit froid, composé en grande partie de rayonnement bleu, entrainera quant à lui une stimulation du système cérébral [19], alors qu'une lumière chaude entrainera un accroissement des hormones du sommeil comme la mélatonine. Enfin une partie de la population s'avère être assujettie à des migraines dues à l'environnement lumineux [20] [21].

Au-delà des aspects énergétiques et environnementaux, prépondérants lors d'améliorations des systèmes intérieurs et extérieurs existants il est important de ne pas négliger les aspects précédents lors de la création de nouvelles sources lumineuses afin de répondre aussi à des critères peu souvent formulés. La suite portera logiquement sur le capteur optique de l'être humain : l'œil.

## 1.4 La fonction visuelle de l'être humain

L'homme perçoit normalement 90% de son environnement proche grâce au sens de la vision et plus particulièrement grâce à son organe visuel : l'œil. Plus exactement l'organe visuel complet qui comprend l'œil, le nerf optique et les parties du cerveau associées à la vision.

La fonction visuelle permet d'acquérir des informations sur le degré de luminosité ainsi que la couleur de l'environnement. L'œil, tel que décrit en figure 5 est dit « impressionné » par un rayonnement électromagnétique extérieur nommé « stimulus visuel ». Il en résulte en suivant une sensation ainsi qu'une perception. De ce fait l'œil humain peut ressentir la force d'une intensité lumineuse tout en percevant la couleur liée à celle-ci.

Cette fonction peut s'avère extrêmement complexe du fait qu'elle englobe beaucoup plus de notions que la lumière seule telles que les dimensions, les formes et les mouvements situés dans le champ de vision. C'est l'ensemble de ces interactions qui définit la vision, c'est-à-dire, utiliser un photorécepteur apte à détecter, localiser et identifier tout objet éclairé par une source lumineuse pour ensuite traiter et transmettre cette information au cerveau.

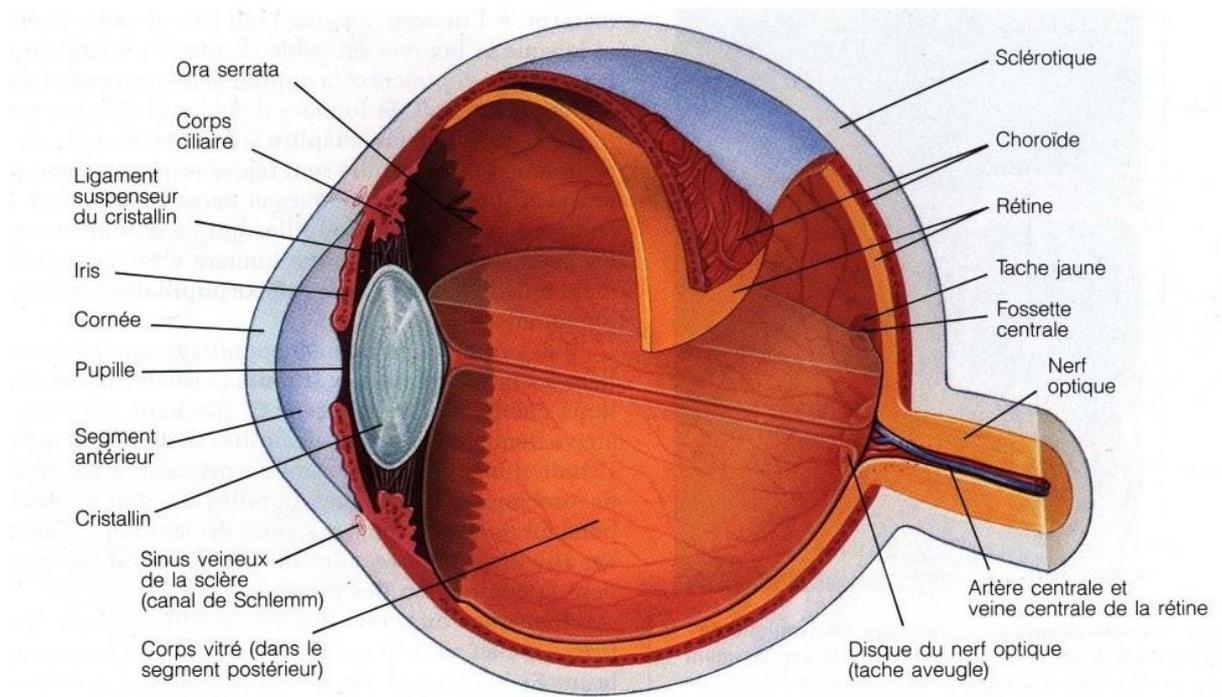


Figure 4 : Coupe de l'œil.

L'œil humain est composé d'un cristallin agissant comme une lentille à focale variable, d'une pupille, commandée par l'iris qui joue le rôle de diaphragme. Deux milieux réfringents composent l'œil, le corps vitré situé entre le cristallin et la rétine et l'humeur aqueuse se trouvant entre la cornée et le cristallin. La rétine, tapissant le fond de l'œil, constitue l'élément photosensible permettant d'assurer la vision [22].

Un important réseau nerveux situé dans l'œil permet de transmettre l'information au cerveau. La rétine est quant à elle constituée de plusieurs types de cellules telle qu'illustrée en figure 5 mais seulement deux types sont réceptrices : les cônes et les bâtonnets. Celles-ci doivent leurs noms à leur forme approximative. Les cônes sont situés sur la partie centrale de la fovéa, la zone centrale de la macula. Cette zone de la rétine est celle où la vision des détails est la plus précise. Les cônes sont très regroupés. En s'éloignant du point fovéal, les bâtonnets remplacent de plus en plus les cônes tel que montré en figure 6. Au total, l'œil contient en moyenne 6,5 millions de cônes pour 115 millions de bâtonnets.

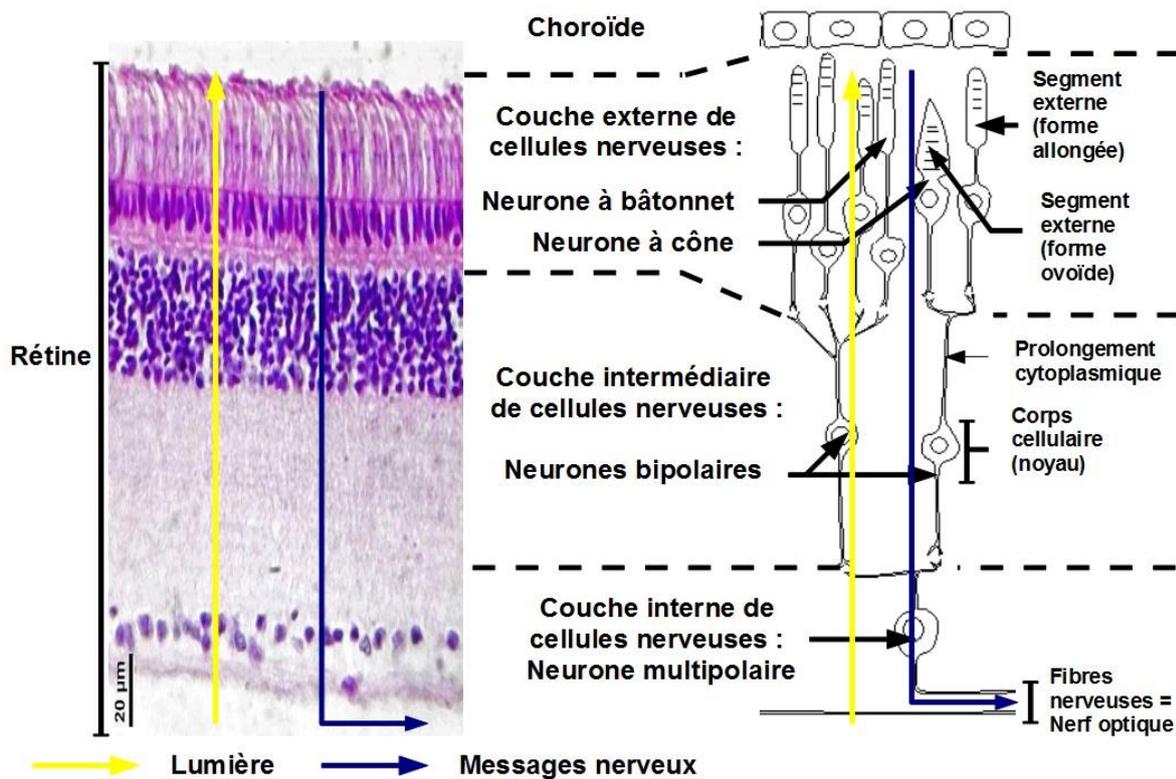


Figure 5 : Observation d'une coupe colorée de rétine (X 400) et schéma de la structure de la rétine [23].

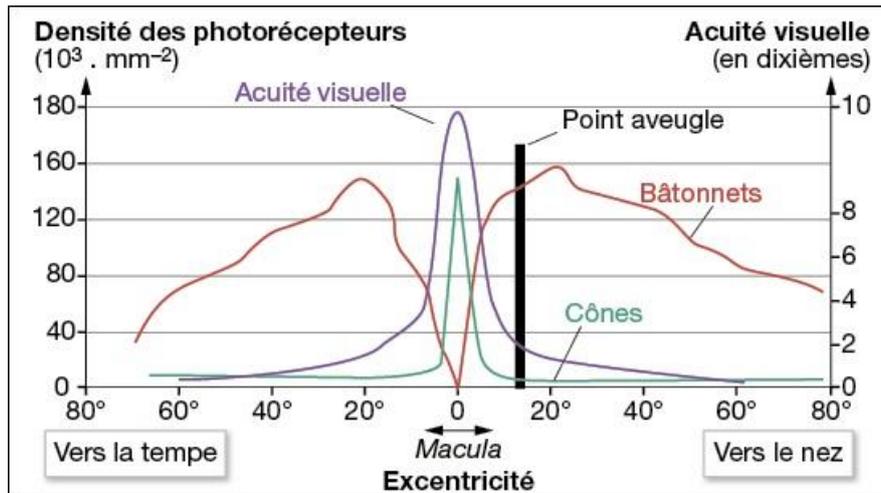


Figure 6 : Densité des photorécepteurs de la rétine humaine [24].

La lumière en pénétrant l'œil produit une réaction physico-chimique au sein de la rétine telle qu'illustrée en figure 7. Selon les conditions, forte ou faible luminosité ambiante, lumière blanche ou colorée, les pigments sensibles à celle-ci réagissent. La vision est alors initiée avec l'absorption d'un photon par un pigment photosensible appelé opsine. Pour les bâtonnets, c'est une protéine nommée rhodopsine qui produit cet effet et l'iodopsine opèrera elle dans les cônes.

Le rétinal ou rétinène quand à lui est la molécule, dérivée de la vitamine A, qui est attachée au milieu du septième domaine transmembranaire de la rhodopsine. Plus précisément c'est sa forme dite « 11-cis » qui, lors de l'absorption de lumière, subit une modification de conformation vers la forme « tout-trans ». C'est ce changement de forme, appelé isomérisation, qui fait passer la rhodopsine à sa forme active : la metarhodopsine II. Cette protéine active autour d'une centaine de protéines G et chaque molécule de phosphodiesterase va provoquer l'hydrolyse d'environ un millier de molécules de GMPc en GMP. C'est ce phénomène d'amplification qui permet aux bâtonnets de détecter la présence de chaque photon. L'étude du fonctionnement de l'organe lumineux humain s'arrêtera dans ce cas ici du fait de la trop grande complexité de la suite de celui-ci, étant de plus grandement dépendantes de bases en neurosciences non nécessaires pour la suite de ce manuscrit étant donné que celui-ci se focalise plus sur la reproduction artificielle de sources se rapprochant du naturel en termes de qualité et d'efficacité lumineuse. Il est laissé au lecteur curieux le loisir d'approfondir cette approche grâce à des ouvrages spécialisés tel que « Éclairage d'intérieur et ambiances visuelles » [25].

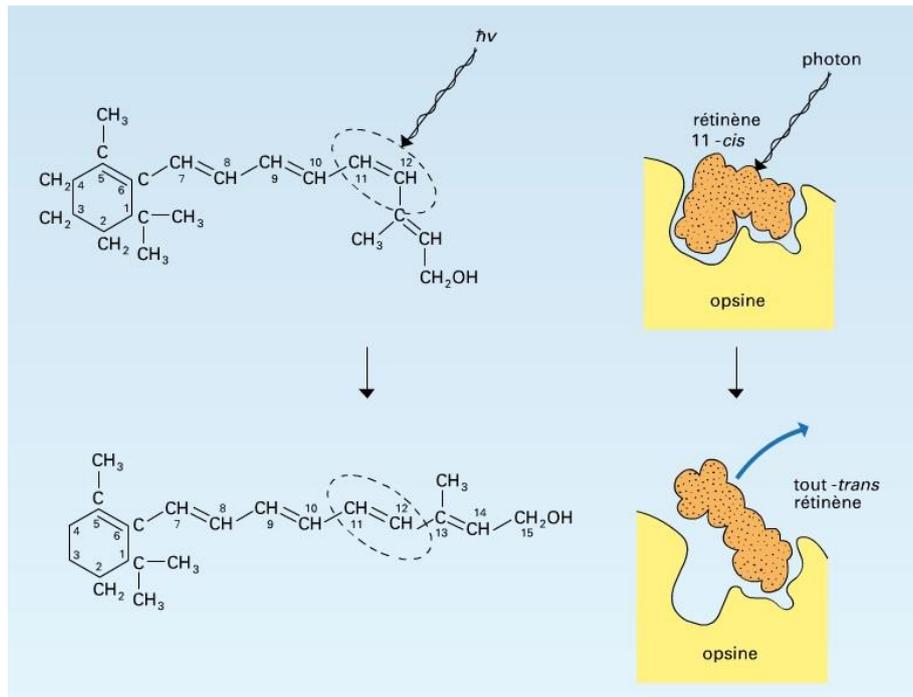


Figure 7 : Principe de détection chimique de la lumière par l'œil humain [26].

## 1.5 Comment qualifier un flux lumineux :

L'étude de la lumière et de la façon dont elle est perçue par l'Homme demande de définir diverses grandeurs physiques primordiales pour la suite. La base définit ici est communément admise comme valable par la communauté des physiciens.

### 1.5.1 Le spectre lumineux

Une source de lumière est définie de manière théorique comme composée de photons qui rayonnent à différents niveaux énergétiques tel que par exemple le soleil sur la figure 8. La figure 9 montre cette densité au niveau du sol terrestre à différent moment du jour.

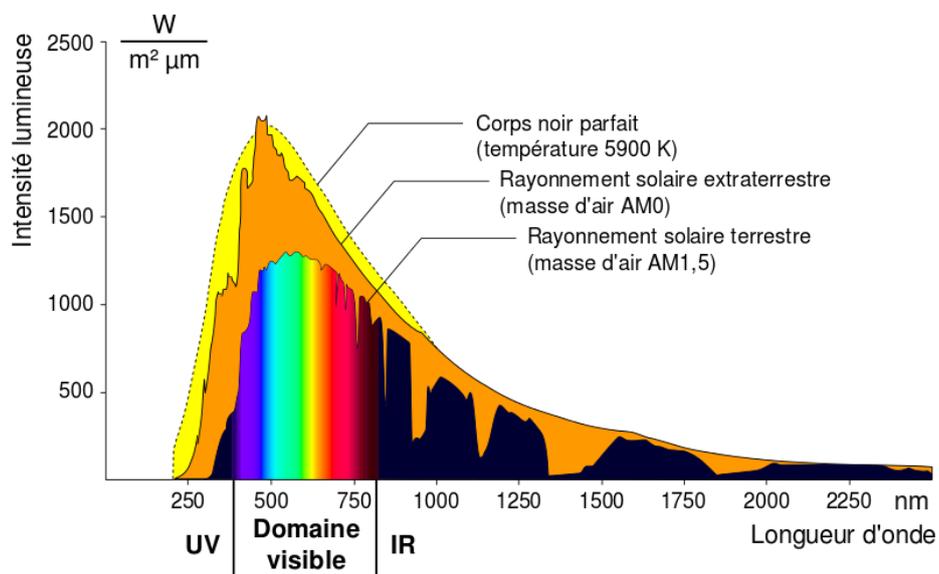


Figure 8 : Spectre de la lumière solaire [27].

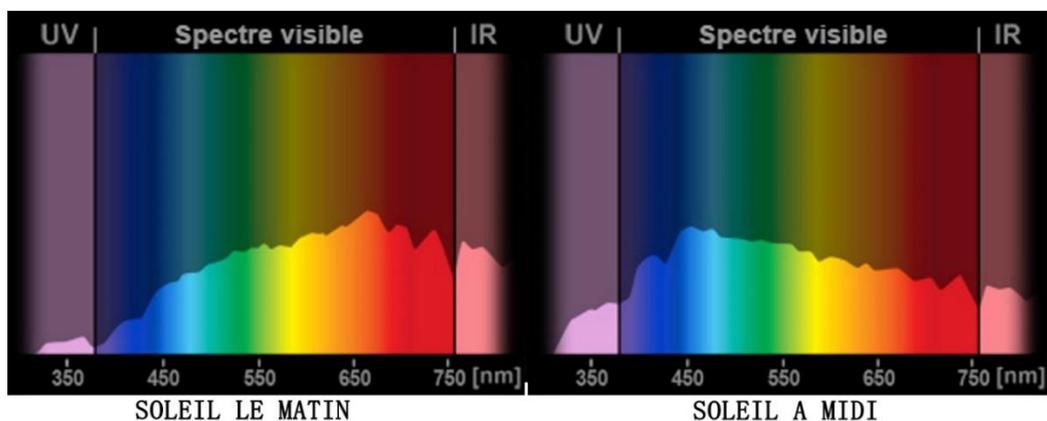


Figure 9 : Spectre typique de la lumière naturelle reçue au sol [28].

Les photons en pénétrant dans l'œil « déposent » leur énergie sur la rétine. L'énergie reçue est d'autant plus importante que le nombre de photons reçu augmente pour un temps donné. En d'autres termes, plus la densité de photons est conséquente et plus la puissance radiométrique perçue par l'œil sera importante. De plus, chaque photon peut être observé selon sa longueur d'onde. En effet l'œil a la capacité de pouvoir discriminer les longueurs d'ondes des photons et donc de les identifier à une couleur précise. Ainsi, un ensemble de photons perçus par l'œil, ou tout support photosensible, fournit deux informations indépendantes servant à caractériser le rayonnement résultant : la puissance, ou flux énergétique, traduisant la sensation de luminosité et la longueur d'onde qui s'interprète sous forme d'une couleur.

Pour chaque longueur d'onde il est ainsi possible de représenter la puissance associée. Cette puissance par unité de longueur d'onde s'appelle le flux spectral énergétique et s'exprime en Watts par nanomètre, W/nm. Le graphisme en résultant s'appelle le spectre lumineux ou encore spectre d'émission. Pour chaque source lumineuse, un spectre unique associé peut être obtenu tel qu'observé dans les exemples suivants

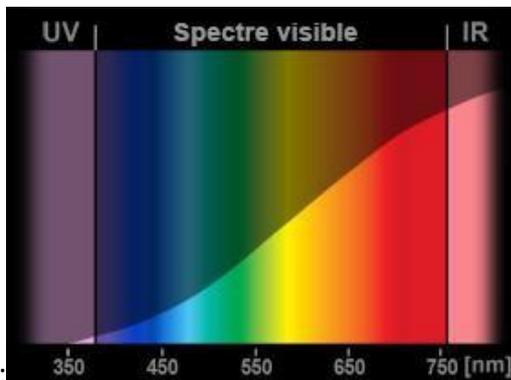


Figure 10a : Spectre typique d'une lampe incandescente ou issue d'une bougie [28].

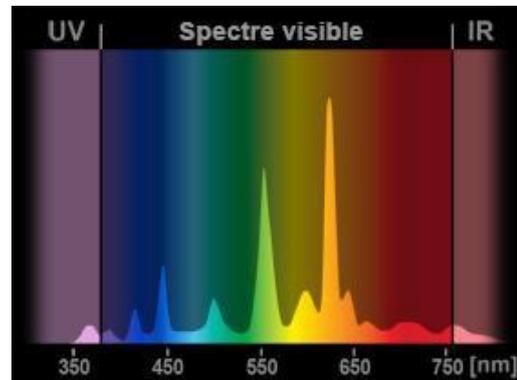


Figure 10b : Spectre typique d'une lampe fluorescente [28].

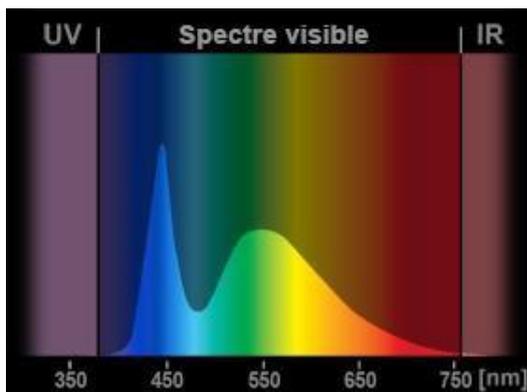


Figure 10c : Spectre typique d'une LED froide [28].

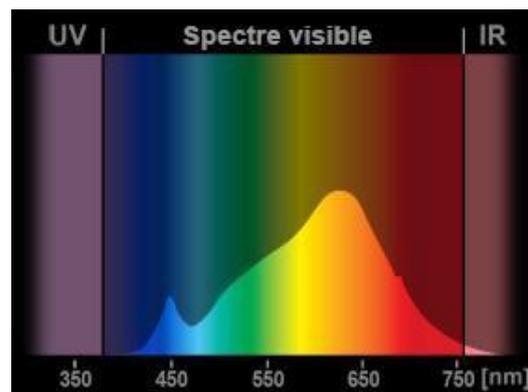


Figure 10d : Spectre typique d'une LED chaude [28].

Comme le montre la figure 10a la source à incandescence partage de fortes similitudes avec le spectre émis par le soleil tel que reçu sur terre. Il est à noter que ce spectre est « continu » avec très peu d'ultra-violet pour une bonne part de rouge et une encore plus importante d'infrarouge. Les lampes fluo-compactes présente un spectre discontinu dit spectre de « raie » ce spectre non homogène, voir figure 10b, présente 4 pics principaux à 405 nm, 436 nm, 546 nm et 615 nm. Ceux-ci sont caractéristiques du mercure. Le spectre d'une LED est en grande partie défini par la technologie utilisée pour sa fabrication, avec ou sans luminophore ou encore de température de couleur différente. Les figures 10c et 10d montrent deux LEDs bleues couplées à un luminophore différent dans le but d'obtenir une lumière « froide » pour la première et « chaude » pour la seconde, le point commun de ces deux spectre étant la séparation entre le pic de lumière bleu à 450 nm résultant de la diode bleue seule et le spectre continu « jaune » suivant déterminé lui par la composition du luminophore utilisé. La notion de température de couleur sera développée dans le prochain chapitre. Chaque spectre lumineux permet d'extraire le flux visible, les coordonnées chromatiques ainsi que la température de couleur de la source mesurée. L'ensemble de ces éléments sera par la suite pris en compte et utilisés dans ces travaux de recherche pour caractériser le rayonnement des sources lumineuses étudiées dans les chapitres suivants.

## 1.5.2 Le flux lumineux et le flux spectral énergétique

Comme vu précédemment, le spectre d'une source lumineuse va grandement varier tant par le nombre de longueurs d'ondes transportant de l'énergie que par le niveau énergétique de chaque longueur d'onde. Dans le cas d'une source n'émettant que sur une seule longueur d'onde, la lumière obtenue est dite monochrome et la source, monochromatique. Malgré tout une source parfaitement monochromatique est impossible à obtenir dans la réalité. Il s'agit avant tout d'une approximation réalisable si la largeur spectrale obtenue en sortie est négligeable pour les besoins techniques ou pédagogiques recherchés. Les sources actuelles ont beaucoup de difficultés à descendre sous la barre du nanomètre en termes de largeur spectrale.

Le flux énergétique d'une source est obtenu en faisant la somme des contributions de chaque longueur d'onde.

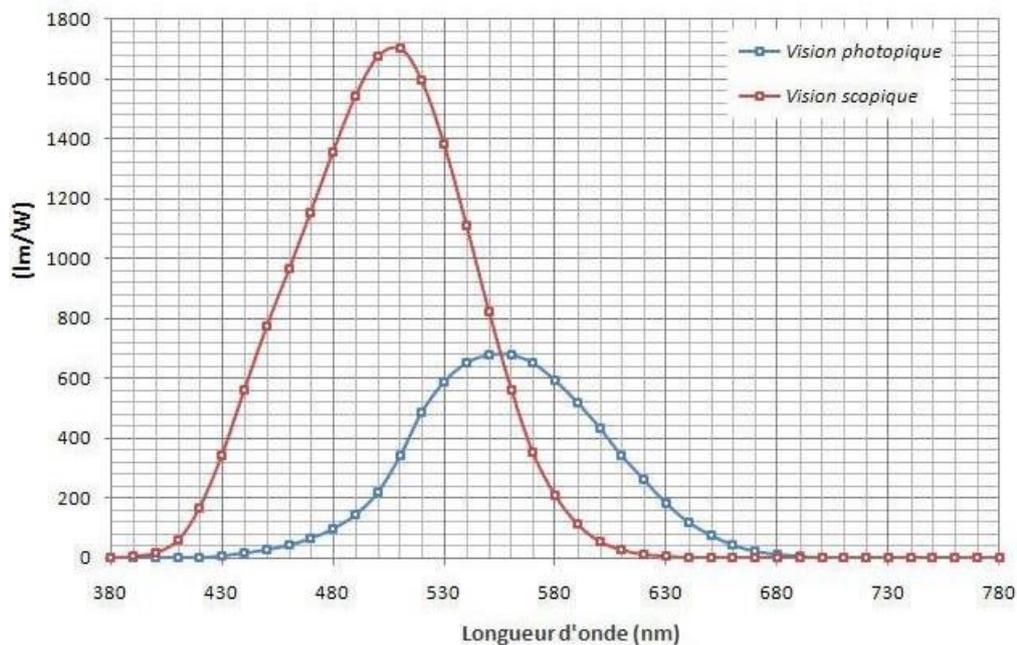
$$1.4 \quad \Phi = \int f(\lambda) d\lambda$$

Avec  $\Phi$  étant le flux magnétique (W),  $f$  étant le flux spectral énergétique et  $\lambda$  la longueur d'onde comprise entre 380 nm et 780 nm.

Lorsqu'une source lumineuse rayonne, elle peut émettre dans une gamme spectrale allant au-delà du spectre visible comme par exemple le rayonnement solaire qui est essentiellement composé de rayonnements infrarouges. Sachant qu'au final seul la contribution visible par l'œil présente un intérêt lumineux, la notion de rendement lumineux a été définie pour représenter la qualité lumineuse obtenue.

En 1924, en se basant sur des travaux de laboratoire spécialisé, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) défini une fonction appelé  $V(\lambda)$ . Cette fonction a pour but de pondérer chaque longueur d'onde mesurée par la sensibilité moyenne de l'œil humain et d'y attribuer une efficacité lumineuse relative. Par la suite le comité international des poids et mesures définira l'unité du flux lumineux comme le lumen par Watt (soit lm/W). L'efficacité lumineuse relative étant définie comme un quotient de deux flux elle reste sans unité.

La figure 11 si dessous montre la différence entre l'efficacité lumineuse spectrale photopique, diurne, se reposant principalement sur les cônes et l'efficacité lumineuse spectrale scotopique, de nuit, se reposant elle sur les bâtonnets.



**Figure 11 : Fonctions d'efficacité lumineuses spectrales diurne (photopique) et nocturne (scotopique) en fonction des longueurs d'ondes.**

Généralement, l'efficacité relative exprime la relation entre le flux spectral d'une source lumineuse et le flux photométrique pouvant être perçu par l'œil. En moyenne, l'œil humain détecte un large intervalle de radiation en vision de jour et sa sensibilité est maximale pour les radiations autour de 555 nm, environ 683 lm/W [29], cette longueur d'onde se situant dans les couleurs jaune-vert. Le bleu et le rouge sont donc moins bien perçus du fait de leur éloignement de la longueur d'onde optimale. De nuit, la sensibilité de l'œil est multipliée par 3 au maximum (1705 lm/W) mais la vision se décale vers le bleu, plus exactement 505 nm donc le bleu-vert rendent le rouge encore plus difficile à décerner. Le tableau suivant se concentre sur l'efficacité lumineuse spectrale relative,  $V(\lambda)$ , de jour en vision photopique.

$\lambda$ (nm)	$V(\lambda)$										
		400	0,000 039	500	0,323 00	600	0,631 00	700	0,004 102	800	0,000 004
		410	0,001 210	510	0,503 00	610	0,503 00	710	0,002 091	810	0,000 002
		420	0,004 00	520	0,710 00	620	0,381 00	720	0,001 047	820	0,000 001
		430	0,011 60	530	0,862 00	630	0,265 00	730	0,000 520	830	0,000 000
		440	0,023 00	540	0,954 00	640	0,175 00	740	0,000 249		
		450	0,038 00	550	0,994 95	650	0,107 00	750	0,000 120		
360	0,000 004	460	0,060 00	560	0,995 00	660	0,061 00	760	0,000 060		
370	0,000 012	470	0,090 98	570	0,952 00	670	0,032 00	770	0,000 030		
380	0,000 039	480	0,139 02	580	0,870 00	680	0,017 00	780	0,000 015		
390	0,000 120	490	0,208 02	590	0,757 00	690	0,008 21	790	0,000 007		

**Tableau 2 : Efficacité lumineuse spectrale relative,  $V(\lambda)$ , en vision photopique [30].**

Pour chaque source lumineuse, la relation liant le flux spectral énergétique au flux visible est la suivante :

$$1.5 \quad \Phi_v = Km \int_{380}^{760} V(\lambda) f(\lambda) d\lambda$$

Avec  $\Phi_v$  étant le flux visible en lumen,  $f(\lambda)$  étant le flux spectral énergétique en W/nm,  $\lambda$  étant la longueur d'onde en nm, Km étant une constante égale à 683 lm/W (correspondant à l'efficacité lumineuse spectrale maximale obtenue pour 555 nm) et  $V(\lambda)$  étant la fonction de sensibilité de l'œil, définie sans unité.

### 1.5.3 Température de couleur et coordonnées chromatiques

L'étude des couleurs est un domaine extrêmement vaste. Comme celle de la lumière, elle regroupe ses spécialistes, ses points de vue et son historique. Pour un physicien, la couleur n'est que le résultat de la décomposition de la lumière blanche et elle est définie par sa longueur d'onde. Pour un physiologiste, étudiant les fonctions organiques de la vision, la couleur est une sensation colorée. Pour un peintre, un teinturier, un imprimeur, la couleur est la matière colorée utilisée pour produire la colorisation. En fonction de son utilisation (photographie, télévision, signalisation, colorant en industrie...), elle peut donc être susceptible de développement particulier. Par exemple, dans le cas d'un éclairagiste, l'attention sera portée sur la couleur des sources et sur l'influence de la lumière sur la couleur des objets ou des surfaces éclairées.

La colorimétrie fondamentale a vu le jour au milieu du XIXe siècle grâce aux travaux de d'Hermann Von Helmholtz et de Maxwell. Cela permet l'établissement de systèmes mathématiques permettant une représentation chiffrée des couleurs, dissociée du jugement subjectif de chaque individu, ayant souvent une perception lui étant propre.

Malgré tout définir une couleur reste compliqué. Dans le cas d'un rayonnement monochromatique, une seule variable suffira : sa longueur d'onde. Il sera donc caractérisable uniquement par celle-ci couplée avec sa luminance. Dans le cas d'un rayonnement plus complexe il faudra, tout comme l'œil humain, être capable d'intégrer celui-ci comme une somme décomposable en un certain nombre de rayonnements monochromatiques ayant des informations de luminance et de longueur d'onde différents.

En 1931 pour aider au référencement des couleurs, un espace des couleurs a été édité par la CIE. Cet espace fut représenté par un triangle définissant chaque point de couleur par des coordonnées  $x$  et  $y$  associés tel que représenté en figure 12. Ce système permis de qualifier chaque source de lumière par ses coordonnées chromatiques. Les deux cotés supérieurs de ce triangle représentent toutes les longueurs d'onde du spectre visible tandis que le troisième coté, appelé ligne des pourpres (Alychne) n'existe pas tel quel dans notre spectre visuel [31]. Le centre de ce triangle est ainsi occupé par une zone de blanc représentant la lumière blanche obtenue par synthèse additive de plusieurs faisceaux monochromatiques. Bien que dans la réalité il existe une infinité de possibilités seules deux seront retenues ici : le blanc dit chaud, composé de longueur d'ondes situées vers le jaune-rouge, sur la droite du triangle de couleurs ci-dessous, plus adapté aux lieux de repos et aux ambiances dites feutrées et le blanc dit froid, plutôt composé de bleu-vert, situé sur la gauche du triangle des couleurs, plus approprié aux zones de travail.

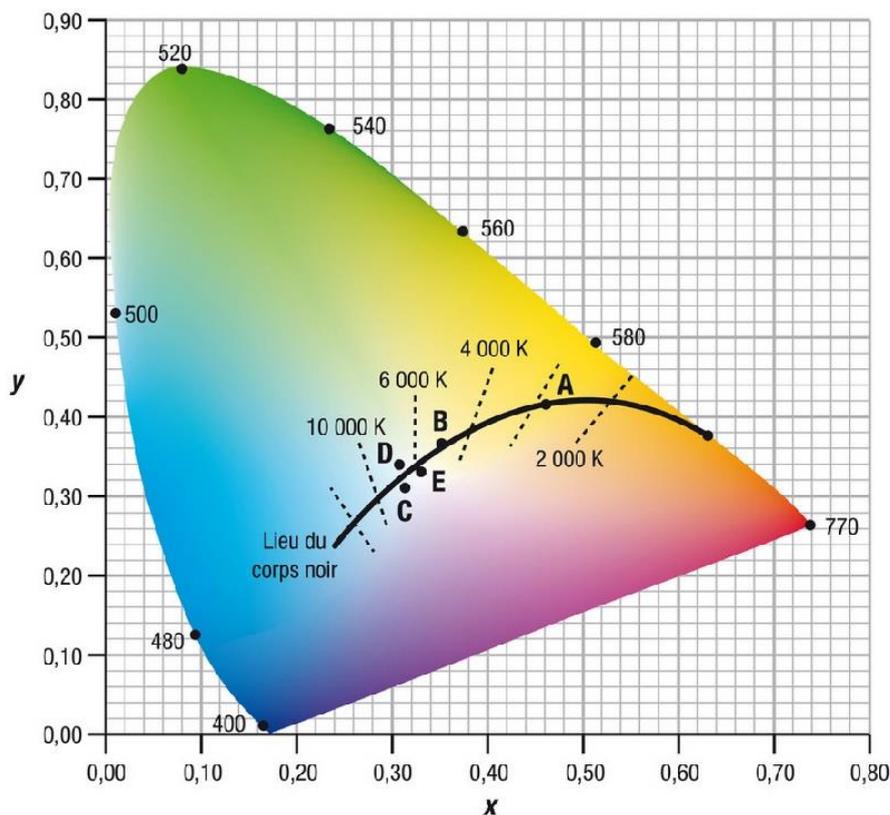
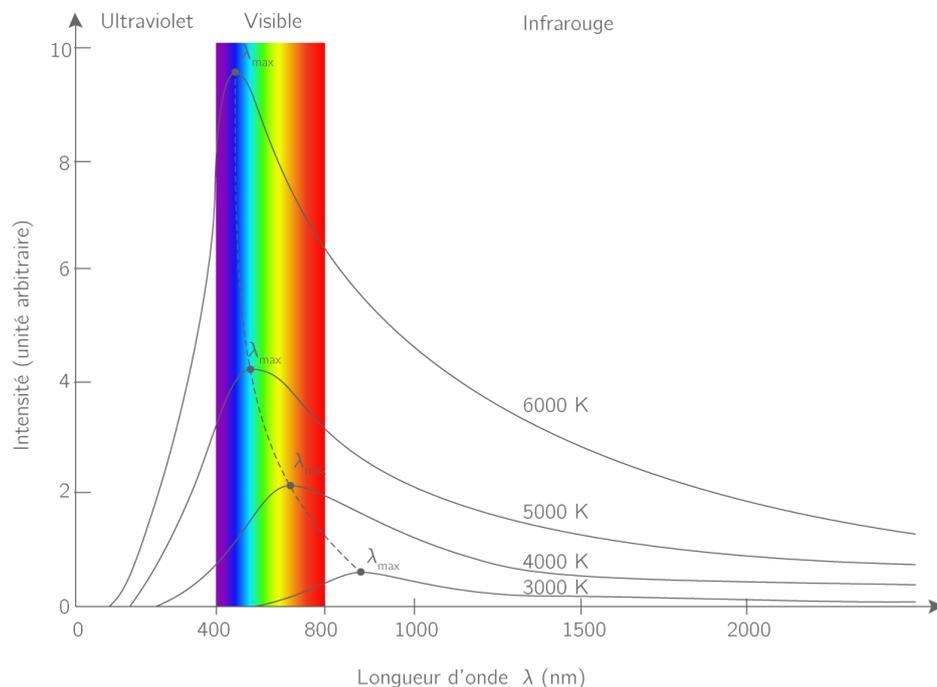


Figure 12 : Triangle des couleurs comprenant la zone du « corps noir ».

Ces notions, anciennes, sont en lien direct avec l'environnement terrestre de l'Homme ainsi que l'évolution de son organe sensoriel visuel comme décrit précédemment. Ainsi les sensations visuelles sont fortement ancrées culturellement car depuis la nuit de temps, l'être humain est éclairé par des sources de lumières dont il a défini la teinte comme chaude pour un blanc se rapprochant des teintes du feu et froide pour un blanc glacé tout en sachant que les premières sources de lumières artificielles étaient liés aux flammes et au soleil. En suivant la première technologie d'ampoule à filament à incandescence s'est ajoutée aux sources précédentes. Ces trois types de sources présentent la particularité d'avoir un rayonnement similaire à l'objet théorique appelé corps noir. Ce dernier définit le rapport entre le rayonnement émis par un objet et sa température [32]. Cette propriété permet alors de définir un spectre lumineux en fonction d'une température (figure 13) [33].



**Figure 13 : Description de la théorie des corps noirs.**

La théorie des corps noirs prend son origine au cœur d'une autre théorie : celle des quanta d'énergie. Cette théorie fut formulée pour la première fois par Max Planck [34] en 1900 puis fut par la suite complétée par nombre de chercheurs dont par exemple Albert Einstein entre 1905 et 1924. Le point de départ de la théorie des corps noirs est la considération d'une enceinte isotherme avec pour conséquence d'avoir ses parois supposées totalement absorbantes. Dans ce cas-là, tout rayonnement extérieur pénétrant dans cette enceinte au moyen d'une cavité adaptée subira de multiples réflexions, émissions et absorptions par les parois jusqu'à atteindre une thermalisation complète. Ce qui signifie que l'enceinte et son contenu de rayonnement atteindraient ainsi un équilibre thermique. Une bonne approximation d'une telle enceinte serait un four. De la même manière qu'un rayonnement peut entrer dans cette enceinte, une partie infime du rayonnement thermique interne peut s'échapper définitivement de celle-ci. C'est ce rayonnement qui permet l'étude expérimentale de ce corps noir, notamment sa répartition énergétique spectrale, c'est-à-dire la densité d'énergie présente par intervalle élémentaire de fréquence.

La thermodynamique permet ensuite de montrer que les caractéristiques de rayonnement obtenues ne dépendent pas de la nature du matériau dont est constituée l'enceinte mais seulement de sa température.

A partir de ce corps théorique, nommé M, Max Planck donne une formule permettant d'obtenir, pour chaque température et longueur d'onde, la réponse spectrale du corps noir :

$$1.6 \quad M(\lambda, T) = (C_1/\lambda^5)/(e^{C_2/\lambda T} - 1)$$

Avec T étant la température en kelvin,  $\lambda$  la longueur d'onde en mètre,  $C_1$  une constante de valeur  $3,7415 \times 10^{-16}$  (unités SI) et  $C_2$  une constante de valeur  $1,43879 \times 10^{-2}$  (unités SI).

Ainsi, pour chaque couleur de coordonnées chromatiques x et y dans le diagramme de chromaticité, une température donnée pourra être associée tel que montré dans le diagramme de la figure 14 si dessous.

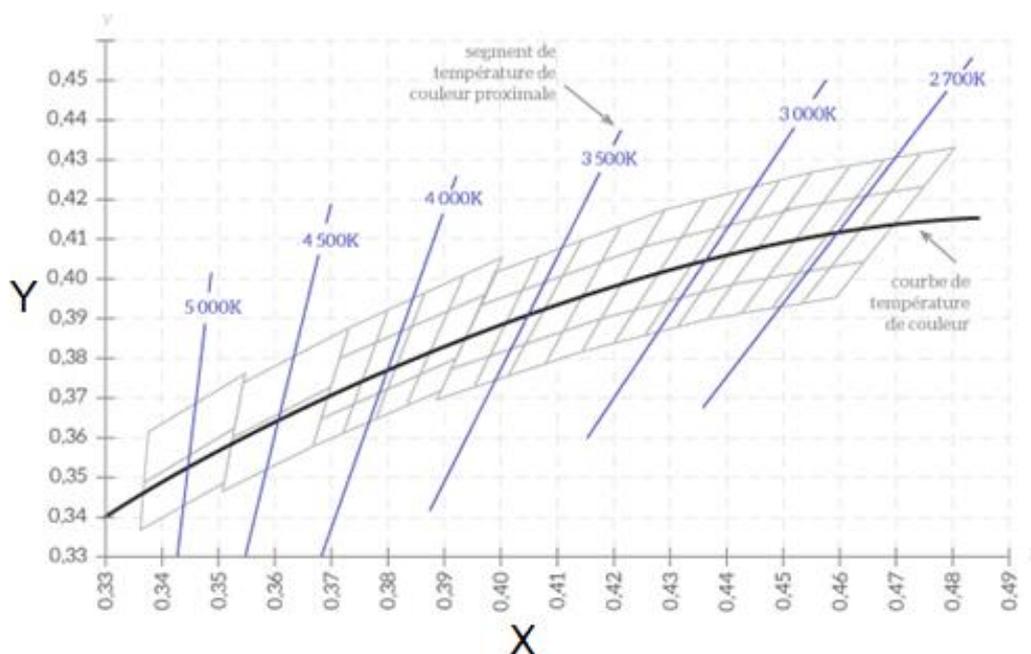


Figure 14 : Température de couleur proximale.

Une autre manière d'appréhender le concept de température de couleur consiste à prendre un matériau et à le chauffer. A partir d'une certaine température ce matériau va devenir incandescent et va illuminer d'une teinte rouge orangé, couleur définie visuellement comme chaude, ensuite plus il va monter en température plus sa couleur virera vers le jaune puis le bleu en tendant inexorablement vers le blanc puis vers le bleu au fur et à mesure que sa température augmente [35]. Du coup bien que la couleur observée corresponde à une température très élevée, au moins supérieure à précédemment, cette couleur sera considérée visuellement comme froide.

C'est cette relation entre la température d'un corps noir et la lumière qu'il émet qui définit sa température de couleur. La figure 14 ci dessous illustre ce principe, en effet à faible température, entre 1000 K et 1500 K, la couleur obtenue est rouge, à partir de 2500 K elle vire au jaune orangé et pour un arc électrique bleuté par exemple elle atteindra les 9000 K. Dans la réalité ces valeurs seront d'autant plus exactes que la couleur obtenue sera située proche de la courbe théorique des corps noir et il sera aussi important de différencier une couleur dite chaude d'un point de vue visuel, comme le rouge, de sa température de couleur qui pour le coup serait froide par rapport à sa valeur numérique.



## 1.6 Les principales sources lumineuses artificielles

Avant d'entrer dans le détail des sources laser étudiées dans ce manuscrit il semble important de faire une synthèse des technologies précédentes afin de lister leurs principaux avantages et inconvénients et d'établir des comparaisons de qualité et de performances

L'utilisation de sources lumineuses artificielles par l'être humain date de temps immémoriaux, dans ce but l'Homme usa de plusieurs techniques lui permettant de générer artificiellement de la lumière lorsque l'absence de sources naturelles se faisait sentir. Aux prémices l'homme usa du simple feu de bois pour ensuite améliorer cette source au moyen de chandelles et autres bougies qui devinrent ensuite lampes à huiles ou à pétrole.

Aujourd'hui même si ces systèmes restent utilisés dans de nombreuses parties du monde la majorité des systèmes d'éclairage artificiel dits modernes utilisent l'énergie électrique pour générer de la lumière quand les sources naturelles sont indisponibles. La production de lumière par incandescence fut mise au point en 1879 grâce à la lampe à incandescence inventée par Joseph Swan puis améliorée par Thomas Edison. Celle-ci gagna rapidement en popularité en dépit de sa très faible efficacité, en effet seulement 5% de l'énergie nécessaire à son fonctionnement est convertie en lumière. Son faible cout de production en fait malgré tout une solution encore abondamment utilisé à l'heure actuelle même si la France par exemple essaye de provoquer sa disparition du territoire. Une autre méthode de production de lumière consiste à utiliser le phénomène physique de transition énergétique dans un gaz particulier appelé « plasma » [36] [37] [38]. Les technologies utilisant cette approche regroupent par exemple les sources fluorescentes, les sources à sodium, les sources à vapeur de mercure ou les sources à iodures métalliques trouvables encore aujourd'hui dans les plus anciens luminaires constituant l'éclairage public français [39].

Une approche équivalente de transition énergétique mise en œuvre cette fois-ci dans des matériaux semi-conducteurs existe également. Il s'agit de l'éclairage à l'état solide regroupant les LEDs, OLEDs et sources laser. Dans le paragraphe suivant les divers types de luminaires historiques seront rappelés ainsi que les principes physiques associés à ceux-ci.

## 1.6.1 Les deux grands phénomènes physiques à l'origine de la création de lumière artificielle.

Bien que les technologies se multiplient, la méthode de fabrication de la lumière à partir d'une source électrique peut se décomposer en 2 grandes parties telles que définies en figure 15.

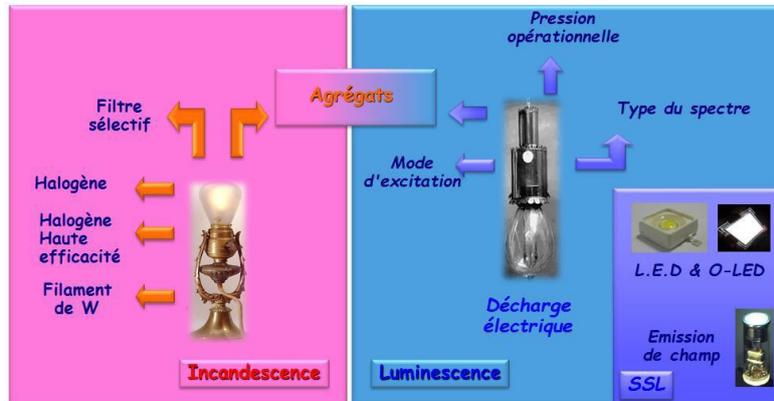


Figure 15 : Principales méthodes de production de lumière.

Ainsi les deux principales méthodes de production de la lumière sont l'incandescence et la luminescence. Au travers des décennies un grand nombre de technologies a pu découler de ces deux phénomènes physiques.

L'incandescence ou la thermo-rayonnance est la méthode se rapprochant le plus de la lumière dite naturelle. En effet le soleil, les lampes à huile, bougies ou ampoules à incandescence sont de bon exemple de ce phénomène. Il s'agit de la méthode la plus ancienne et la plus répandue pour la création de sources lumineuses artificielles. Le principe de l'incandescence est un phénomène physique qui se manifeste par une émission de lumière induite par la chauffe importante d'un corps tel que vu précédemment pour définir la température de couleur. De ce fait un corps atteignant une température suffisante se verra émettre un rayonnement électromagnétique situé dans le spectre visible. La qualité de la lumière obtenue sera étroitement liée à la température à laquelle le corps est porté. Un corps faiblement chauffé, environ 1 600 K, émettra une lumière rouge-orangée tandis qu'une température plus élevée, environ 5 000 K par exemple, émettra une lumière très blanche, pouvant même virer vers un blanc bleuté pour des températures avoisinant 9 000 K. La lumière obtenue possèdera un spectre continu constitué en grande partie d'infra-rouges expliquant le faible rendement de ce genre de source [40].

La luminescence quant à elle est dite à production froide, ayant peu de rayonnement infrarouge par comparaison avec l'incandescence dite à production chaude. Cette méthode permet de produire de la lumière par interaction entre particules électriquement chargées. Les cas les plus communs consistent en des transitions électroniques se produisant dans des atomes, molécules ou cristaux provoquant ainsi l'émission de photons. L'énergie libérée sous forme lumineuse peut initialement être fournie sous forme électrique, chimique, mécanique ou lumineuse. Il est possible de distinguer différents types de luminescence selon le mode d'excitation initial : électroluminescence, photoluminescence, fluorescence, phosphorescence et d'autres.

## 1.6.2 Les sources à incandescence

### 1.6.2.1 La chandelle (figure 16) :

La chandelle fut l'un des premiers moyens d'éclairage et le seul présenté ici n'utilisant pas d'électricité pour produire de la lumière. Elle est constituée d'une mèche entourée de matière combustible solide. Elle fut progressivement supplantée par la bougie, qui ne s'en distingue que par sa composition. La chandelle a longtemps servi d'étalon pour une notion toujours fondamentale en photométrie : l'intensité lumineuse exprimée en candela (cd) [41].



Figure 16 : Chandelle en cire d'abeille.

### 1.6.2.2 L'ampoule à incandescence (figure 17) :

Cette technologie fut la première à utiliser l'électricité pour produire de la lumière. Bien que les différentes parties la constituant aient évoluées au fil du temps, filament, support, verre protecteur, gaz interne, la géométrie et le principe de fonctionnement restent similaires. A la base un filament de tungstène est enfermé dans une ampoule en verre dans lequel un gaz noble, krypton, argon ou du vide est placé, le passage du courant dans le filament entraîne sa montée en température qui provoque une émission lumineuse [42].

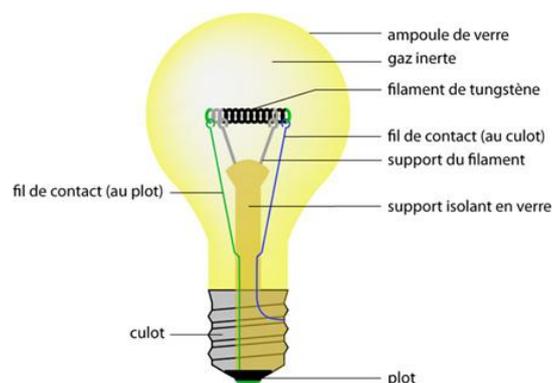


Figure 17 : composition d'une ampoule à incandescence.

### 1.6.2.3 La lampe à halogène (figure 18) :

La lampe à halogène produit de la lumière de la même façon qu'une ampoule à incandescence là où elle se démarque c'est dans la composition du milieu de diffusion entourant le filament de tungstène. Des gaz halogénés, iode et brome, sont introduits à haute pression dans une ampoule en verre de quartz, utilisé pour sa résistance aux hautes températures [43]. Cela permet d'améliorer légèrement l'efficacité de la lampe et la durée de vie du filament.



Figure 18 : Lampe à halogène.

Le fonctionnement est le suivant : Après avoir mis la source sous tension, il y a échauffement du fil de tungstène produisant ainsi de la lumière. De plus la haute température entraîne l'évaporation du tungstène puis la combinaison de celui-ci avec le gaz halogène dans l'ampoule. En refroidissant elle provoque la séparation du tungstène qui, grâce à la pression retourne sur le filament (figure 19) [44].

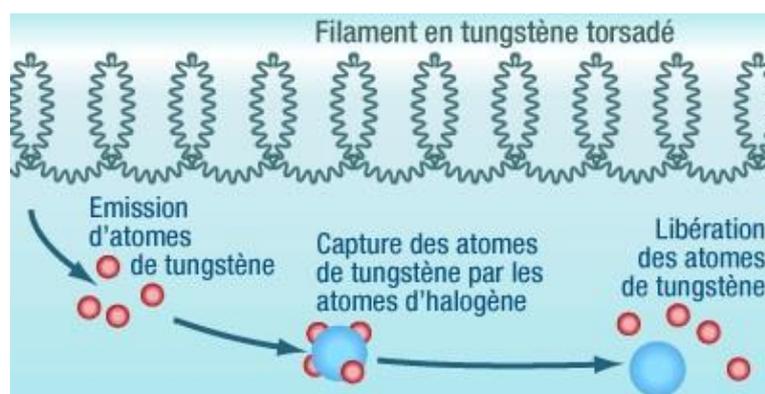


Figure 19 : principe de combinaison du tungstène.

## 1.6.3 Les sources à luminescence.

### 1.6.3.1 La lampe fluorescente :

Les lampes fluorescentes regroupent deux types principaux de sources lumineuses, les tubes fluorescents linéaires appelés tubes néon et les lampes fluorescentes compactes appelées lampes basse consommation. Ces deux technologies fonctionnent sur le même principe depuis leur création en 1930 : Deux électrodes de chaque côté d'un tube vont créer une décharge électrique ionisant un gaz contenu dans celui-ci. Ce gaz est principalement constitué de mercure et de gaz neutres. Le tube est recouvert sur sa surface interne d'une poudre fluorescente.

Les atomes de mercure, entre autres, sont excités par cette ionisation et produisent une lumière dans les courtes longueurs d'ondes, les ultraviolets, qui va à son tour exciter les particules de phosphore situées sur la paroi du tube, lesquelles vont émettre à leur tour de la lumière qui cette fois-ci est blanche. Ce principe s'appelle la fluorescence (figure 20) [45].

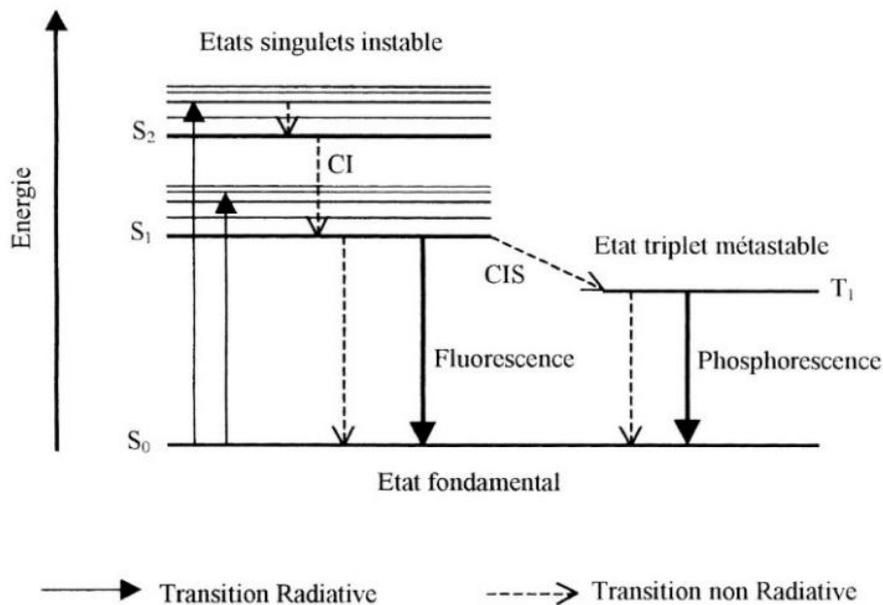


Figure 20 : principe de fluorescence et de phosphorescence.

### 1.6.3.2 Le tube fluorescent (figure 21) :

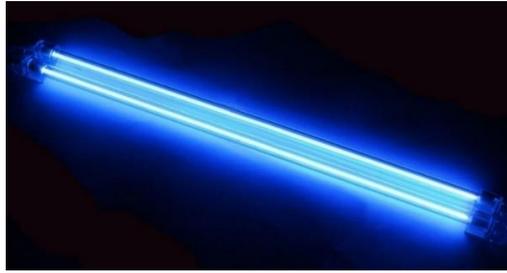


Figure 21 : Tube fluorescent en fonctionnement.

Chaque lampe fluorescente nécessite deux auxiliaires électriques, le starter et le ballast. Ce dernier va permettre la surtension nécessaire à l'amorçage du tube puis limiter le courant d'arc lorsque le tube sera amorcé. Le starter quant à lui est un petit tube rempli de gaz et muni d'un bilame, il permet le préchauffage des électrodes du tube principal et l'amorçage de la décharge.

La mise en marche se fait comme suit : la mise sous tension du tube fluorescent s'opère grâce à un interrupteur puis le starter, composé de 2 bilames est soumis à une tension alternative, 230 V en France, qui va entraîner un claquage de l'air amorçant le starter. Le courant traverse le ballast, les électrodes, entraînant leur préchauffage et le starter. Ce courant va provoquer dans ce dernier une montée en température qui va déformer les bilames. En se déformant elles vont ouvrir le circuit créant ainsi un fort différentiel de courant. Le ballast étant grandement composé d'inductance va tenter de s'opposer à la chute brusque du courant, induisant une surtension de plusieurs dizaines de milliers de Volts et l'amorçage d'un arc électrique au sein du tube fluorescent. Une fois cet arc stabilisé, le ballast va stabiliser la valeur du courant. Un plasma va se former dans le tube et émettre des rayonnements pour la plupart invisibles. Enfin la poudre fluorescente déposée sur la paroi interne du tube va réagir à ces rayonnements et les convertir en lumière blanche par fluorescence [46].

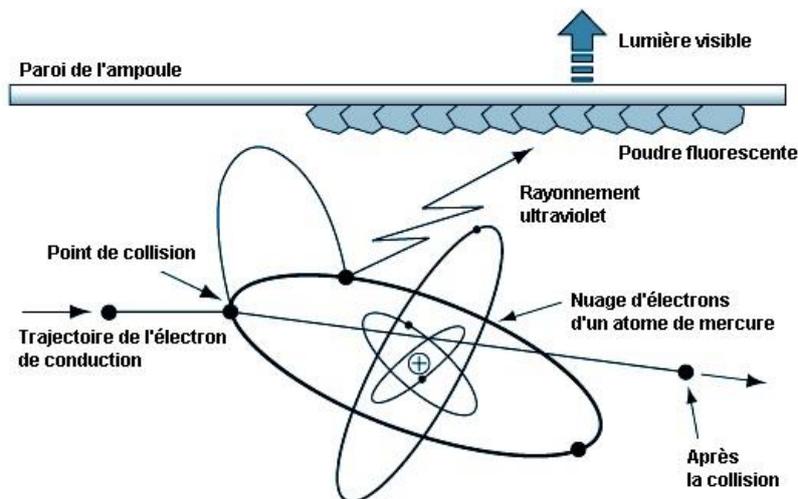


Figure 22 : création de lumière dans un tube fluorescent.

### 1.6.3.3 La lampe fluo-compacte (figure 23) :



**Figure 23 : Lampe fluo-compacte spirale.**

La lampe fluorescente compacte ou source fluo-compacte est une optimisation du tube fluorescent pour un usage domestique. C'est un tube fluorescent miniaturisé, plié ou enroulé et doté d'un culot contenant un ballast électronique [47].

Elle est dotée des mêmes avantages et inconvénients que le tube fluorescent linéaire à l'exception près que le tube de cette lampe n'est pas remplaçable en cas de rupture. De plus son efficacité lumineuse est moindre.

### 1.6.3.4 La lampe à vapeur de mercure (figure 24) :

Cette source lumineuse fut largement utilisée en France pour l'éclairage public en raison de son rendement supérieur aux lampes à incandescence tout en conservant un cout minime. Elle contient un mélange de vapeur de mercure et d'argon et étant une lampe à décharge fonctionne sur le même principe que les lampes fluorescentes.

Pour obtenir l'ionisation du gaz, la tension appliquée aux bornes du tube à décharge doit atteindre une valeur suffisamment élevée, appelée tension d'amorçage. Pour cela il faut un amorceur créant la surtension. Une fois l'amorçage effectué, le courant augmente rapidement car le processus d'ionisation tend à se développer lui-même. Il faut ensuite réduire la tension pour stabiliser la décharge, un ballast est une fois de plus nécessaire. Dans le cas des lampes à vapeur de mercure haute pression, au moment de l'allumage seul un arc électrique à basse pression se produit créant alors une faible quantité de lumière. Ce n'est que lorsque la pression augmente avec la température que le mercure se vaporise créant un arc à haute pression augmentant l'émission lumineuse [48].

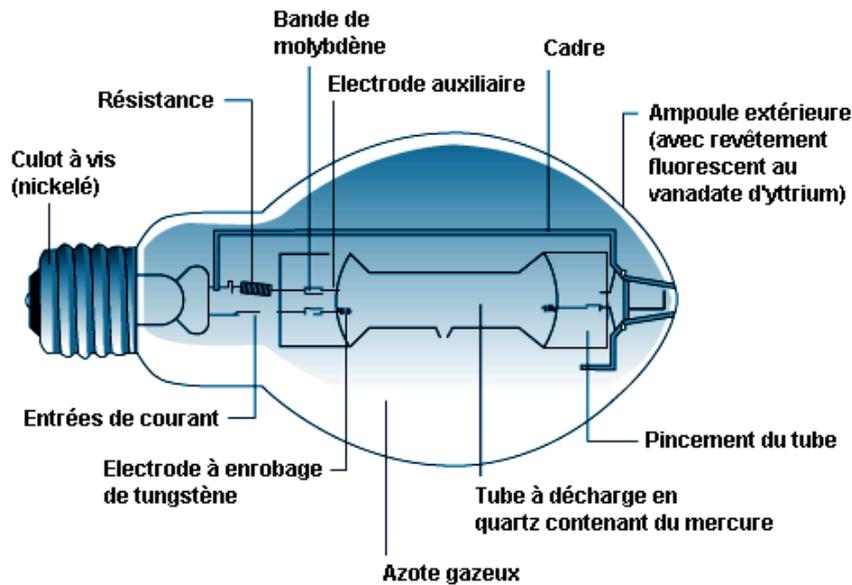


Figure 24 : composition d'une lampe à vapeur de mercure.

### 1.6.3.5 Lampe à vapeur de sodium :

Cette source fonctionne sur le même principe que la précédente à ceci près qu'elle ne comporte aucun revêtement fluorescent sur sa partie interne. Elle nécessite en outre des mêmes auxiliaires électriques que la lampe à vapeur de mercure. Là où cette source se démarque c'est au niveau de sa durée de vie ainsi que de son efficacité, toutes deux bien supérieures à celles des modèles précédents. Elles sont aussi caractérisées par des lumières plus proches du jaune et donc perçues comme plus chaudes que les deux sources précédentes. Leur bonne efficacité lumineuse leur a valu un bon déploiement sur le territoire français. Leur allumage se déroule en deux parties : tout d'abord, une décharge est produite grâce à un mélange de néon et d'argon puis celle-ci permet de vaporiser peu à peu le sodium contenu à l'état solide, sodium qui induira la fluorescence [49]. Au fur et à mesure de la mise en marche la lampe va passer d'une lumière rouge à une couleur jaune-orangé située généralement autour de 590 nm de longueur d'onde (figure 25).



Figure 25 : lampe à vapeur de sodium stabilisée.

### 1.6.3.6 Lampe à induction :

Comme dans les lampes fluorescentes, la lumière est produite par ionisation des atomes de gaz présents dans l'ampoule. Et comme pour les tubes fluorescents les rayonnements invisibles obtenus sont convertis en rayonnements visibles par une poudre fluorescente présente sur la face interne de l'ampoule. Ce type de source se différencie par l'absence d'électrode, en effet l'ionisation des atomes est ici réalisée par un champ électromagnétique créé par la circulation d'un courant à haute fréquence dans une bobine appelée « antenne » [50]. Cette bobine est placée au centre de l'ampoule dans une cavité prévue à cet effet. Le courant à haute fréquence nécessaire est produit par un générateur externe. Ce générateur est directement relié à la bobine centrale (figure 26).

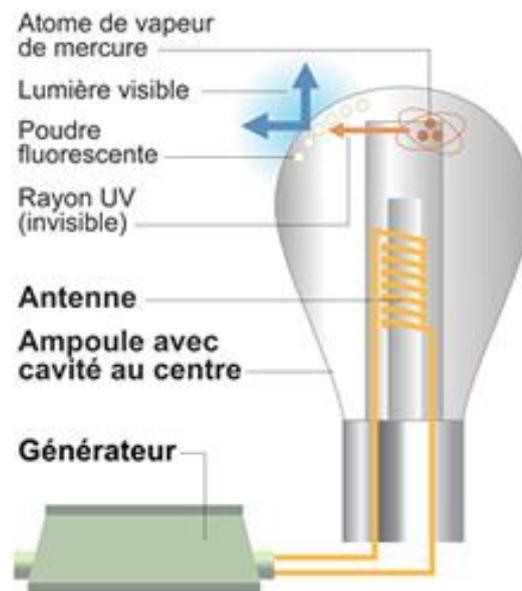


Figure 26 : composition d'une lampe à induction.



## 1.7 L'électroluminescence.

### 1.7.1 Généralités et historique.

L'électroluminescence est un cas particulier de la luminescence qui doit être traité à part du fait de son importance dans la compréhension de la suite de ce manuscrit. En effet les sources électroluminescentes, en particulier les LEDs sont à la base du fonctionnement de la source laser développée dans le chapitre 2.

L'électroluminescence est un phénomène à la fois optique et électrique se produisant généralement à la surface d'un matériau semi-conducteur. Ce phénomène fait que lorsqu'un matériau semi-conducteur est traversé par un courant électrique il peut se mettre à émettre de la lumière. Historiquement ce principe se base sur le fonctionnement des diodes électroluminescentes, ou LEDs. Il fut présenté par Henry Joseph Round en 1907 [51]. Henry Round observa que certains semi-conducteur, le carbure de silicium dans ce cas, émettaient de la lumière lors d'une stimulation par courant électrique. Etant un des pionniers de la radio il observa ce phénomène alors qu'il était en train de faire passer un courant électrique dans divers composants à base de matériaux semi-conducteurs afin d'améliorer l'amplification de signaux radio. En 1921 c'est le physicien Oleg Lossev qui observa à nouveau ce phénomène d'émission de lumière appelé alors effet de Round. Il fut le premier à avoir étudié plus en détail le comportement de diodes à base de matériaux semi-conducteur qui seront renommées plus tard Light Emitting Diodes. Il fabriqua pour mener ses recherches une diode cristalline composée d'oxyde de zinc et de carbure de silicium qui, comme il le supposait émit des photons lorsqu'elle fut parcourue par un courant électrique. Les travaux d'Oleg Lossev furent publiés en 1927, tout d'abord dans un journal russe puis dans des journaux britanniques et allemands. Il breveta en suivant le principe de relais de lumière « Light Relay », ainsi que son utilisation dans les télécommunications.

En 1962, une des premières diodes électroluminescentes arriva sur le marché. Elle était composée de phosphore-arséniure de gallium et fut développée par l'ingénieur américain Nick Holonyak. Cette LED, émettant dans le rouge marqua l'arrivée des LEDs produites de manière industrielles. C'est en 1971 qu'une avancée dans le domaine des semi-conducteurs, avec la découverte de nouveaux matériaux, permit d'obtenir les premières LEDs non plus rouges mais vertes, orange ou jaunes. En 1992, Shuji Nakamura, ingénieur en électronique et professeur à l'université de Santa Barbara, développa la première LED à base de nitrure de gallium à haute brillance, ainsi que la première LED capable d'émettre dans le bleu. Cette avancée ouvrit la voie aux sources lumineuses à base de LEDs pouvant produire de la lumière blanche et donc être utilisées tant pour l'éclairage intérieur que extérieur. Shuji Nakamura développa en suivant des LEDs émettant dans l'ultraviolet. En 1993, la première source lumineuse blanche résultant du couplage d'une LED bleue avec un luminophore jaune composé de grenat d'yttrium et d'aluminium vit le jour. En 2006 le fabricant Nichia obtiens un rendement lumineux de 150 lm/W avec une LED [52]. Jusque-là de telles performances s'obtenaient seulement sur les meilleures lampes à décharge. Ce résultat a été obtenu pour un courant nominal de 20 mA, une température de couleur de 4600 K et un indice de rendu des couleurs de 95.

En 2010, le fabricant CREE atteint le seuil de 208 lm/W [53] pour une température de couleur de 4579 K et un courant nominal de 350 mA. Enfin en 2014 le même fabricant atteindra un rendement lumineux de 303 lm/W [54] pour une température de couleur de 5130 K et un courant nominal de 350 mA.

De la même manière que la loi de Moore décrit le développement de la puissance de calcul des ordinateurs, il existe une loi régissant l'efficacité des LEDs. Plus précisément la loi de Haitz montre que chaque décennie voit le cout par lumen divisé par 10 ainsi que la quantité de lumière émise par élément être multiplié par 20. Tant que cette loi se vérifie elle permet à ces semi-conducteurs de se faire une place toujours plus importante dans l'ensemble des domaines liés à l'éclairage.

### 1.7.2 Les diodes électroluminescentes organiques.

Les diodes électroluminescentes organiques ou OLEDs furent la première alternative aux LEDs à être envisagée. Leur fonctionnement est similaire en tout point à celui des LEDs sauf qu'une OLED utilise des matériaux organique pour la production des porteurs positifs et négatifs. Elle se compose d'une superposition de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs organiques de typiquement 100 nm d'épaisseur [55]. Ces couches sont placées entre deux électrodes dont l'une au moins est transparente (voir figure 27).

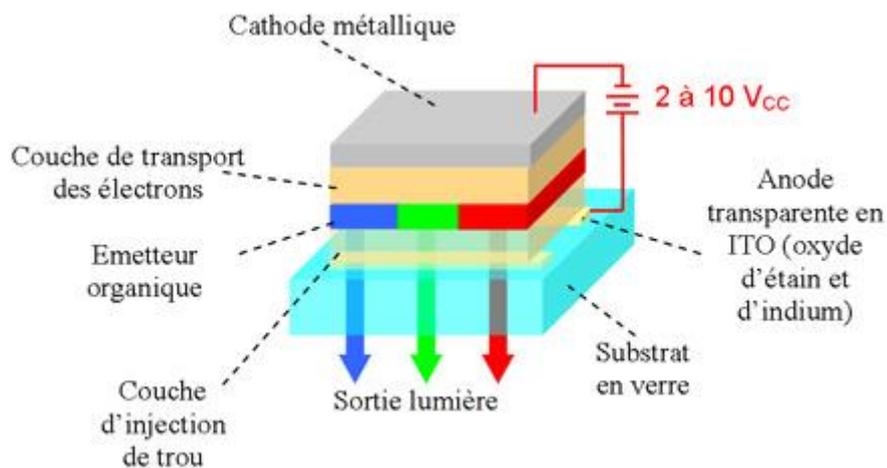


Figure 27 : Architecture d'une OLED.

Les OLEDs se classent en deux familles : les OLEDs traditionnelles utilisant de petites molécules déposées sur le substrat pour émettre la lumière d'une part et les autres OLEDs utilisant des polymères pour transformer l'électricité en lumière d'autre part. De plus depuis que l'impression des OLEDs est possible sur du plastique au lieu du verre utilisé jusque-là leurs dimensions se sont vus réduites et leurs souplesse augmentée.

Parmi ces avantages le plus à même de permettre aux OLEDs de prendre le pas sur la technologie LCD se trouve être la finesse de celles-ci. De plus une OLED ne nécessite aucun rétroéclairage lors de son utilisation comme écran vidéo. Ces raisons font que les OLEDs se démocratisent de plus en plus dans le domaine des écrans plats/géants, consoles de jeux ou encore smartphones. Enfin leur souplesse pourrait permettre aux OLEDs d'être complémentaire à l'éclairage LED actuel pour certaines applications.

## 1.8 Conclusion

La lumière reste aujourd'hui encore, un concept extrêmement abstrait ayant une reproductibilité très dépendante des protocoles de création et de mesure de celle-ci. Etant pour l'instant encore définie comme un phénomène ondulatoire et corpusculaire il n'existe pas encore de solution simple pour la décrire. Cependant une fois cet obstacle accepté et franchi il s'avère qu'il existe un grand nombre de manière de la synthétiser : de l'incandescence à la lampe à décharge en passant par l'électroluminescence de matériaux solide les méthodes de créations de sources lumineuses ne manquent pas. Malgré-tout, les mécanismes permettant de la voir pour l'œil humain, ou de la mesurer dans le cadre de recherches, restent eux éminemment complexes. Il existe à l'heure actuelle un bon nombre de grandeurs ayant pour but de permettre une meilleure caractérisation possible d'une source lumineuse afin de pouvoir contrôler au mieux tous les aspects de celle-ci de son flux, traduisant la puissance d'une source, à sa luminance, permettant de définir les sensations d'éblouissement. Enfin les grandeurs comme le spectre lumineux ou la température des couleurs permettront d'agir sur des domaines allant du simple confort de travail à l'optimisation des repos via le contrôle du cycle de sommeil de l'utilisateur.



# Chapitre 2 : De l'électroluminescence à la diode laser ainsi que le couplage au luminophore.

## 2.1 Introduction.

Ce chapitre va permettre d'approfondir la compréhension des matériaux semi-conducteurs ainsi que leurs applications dans le domaine de l'éclairage. Après avoir revu les bases de physique du solide nécessaires, il sera question du principe de fonctionnement d'une diode électroluminescente puis d'une diode laser en passant par une explication de l'effet laser. En suivant, des applications du couplage LED luminophore seront présentées ainsi que les liens pouvant être fait dans le cas de l'utilisation d'une diode laser à la place d'une LED. Les luminophores actuels étant majoritairement optimisés pour les LEDs il sera aussi question d'étudier les caractéristiques nécessaires et recherchées pour un bon luminophore. La partie sur les sources LEDs traitera aussi sur les réseaux de LEDs utilisés pour obtenir une puissance optique se rapprochant de celle d'une diode laser afin d'en connaître la modélisation et d'appliquer ses caractéristiques primordiales à la situation souhaitée ici. Dans ce but ces modèles devront décrire relativement précisément le comportement du réseau de LEDs dans son ensemble tout en rendant compte de l'impact de chaque LEDs sur celles lui étant adjacentes. L'étude du phénomène laser permettra elle de voir l'avantage d'utiliser cette technologie par rapport à la précédente ainsi que ses caractéristiques principales afin de pouvoir en faire un modèle le plus pertinent possible. Ensuite l'attention se portera sur les luminophores avec, tout d'abord la présentation des plus communs actuellement ainsi que l'analyse des phénomènes rechercher dans le cadre de l'éclairage. En effets des paramètres primordiaux des sources lumineuses tels que les coordonnées chromatiques, la température de couleur ou l'indice de rendu des couleurs, ou CRI, sont étroitement liés à la composition du luminophore associé à la diode laser. Enfin la fin de ce chapitre se portera sur le couplage de la diode laser avec le luminophore et définira les grandeurs à prendre en compte afin de modéliser au mieux la source lumineuse résultante puis les chapitres suivant montrerons les modifications possibles et à étudier sur ce modèle afin d'adapter au maximum le luminophore à la diode laser.



## 2.2 Les bases des diodes électroluminescentes.

Une diode électroluminescente, que nous appellerons désormais par son acronyme anglais LED, peut se définir comme un composant optoélectronique, celui-ci émettant de la lumière lorsqu'il est traversé par un courant électrique. La particularité primale d'une LED est sa capacité à émettre de la lumière à partir d'un ou plusieurs matériaux semi-conducteurs à l'état solide.

La LED est assez proche des diodes électroniques classiques. Ainsi elle nécessite des techniques de conception technologiques et des matériaux semi-conducteurs identiques. Son comportement, pouvant être tantôt isolant, tantôt conducteur électrique s'explique par la théorie des bandes d'énergie [56]. Ce comportement sera influencé par la topologie employée, le taux de dopage du semi-conducteur et des dimensions mises en œuvre. En première approche, une LED peut être définie comme un composant électronique constitué par la juxtaposition de deux matériaux semi-conducteurs. Cette association se comporte ensuite comme la jonction PN d'une diode. Pour cela, et encore une fois comme pour une diode, l'un des matériaux doit être dopé fortement en porteurs positifs, reproduisant ainsi la zone P, et le second en porteurs négatifs, reproduisant la zone N. L'association des deux donne donc une jonction PN telle que décrite dans les figures 28 et 29 suivantes.

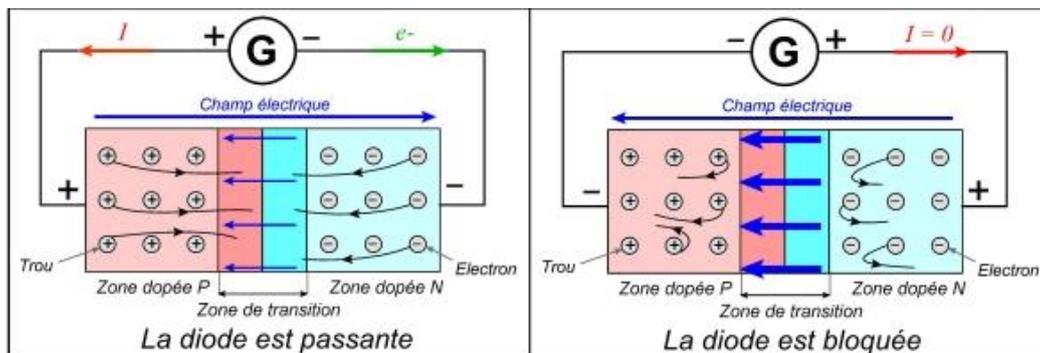


Figure 28 : Jonction PN d'une diode [56].

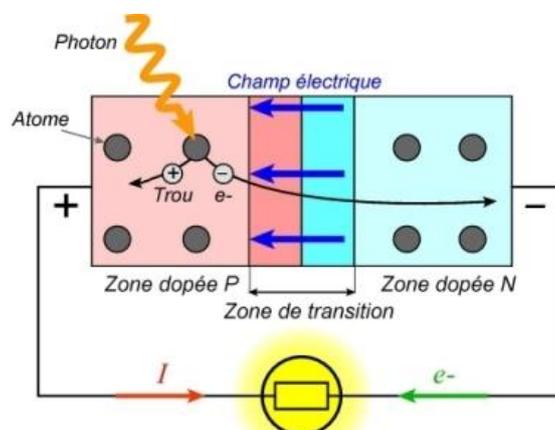


Figure 29 : Jonction PN d'une LED [56].

La théorie des bandes d'énergie d'un matériau définit qu'un électron dans ce matériau ne peut prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles nommées « bandes d'énergie permises ». Ces bandes sont séparées elles-mêmes par d'autres appelées « bandes interdites ». Une représentation permettant une compréhension aisée de ce phénomène physique est donnée en figure 30, celle-ci montrant plusieurs matériaux aux propriétés électriques intrinsèques différentes : un conducteur, un semi-conducteur et un isolant tel que décrit dans plusieurs ouvrages de références [56] [57] [58].

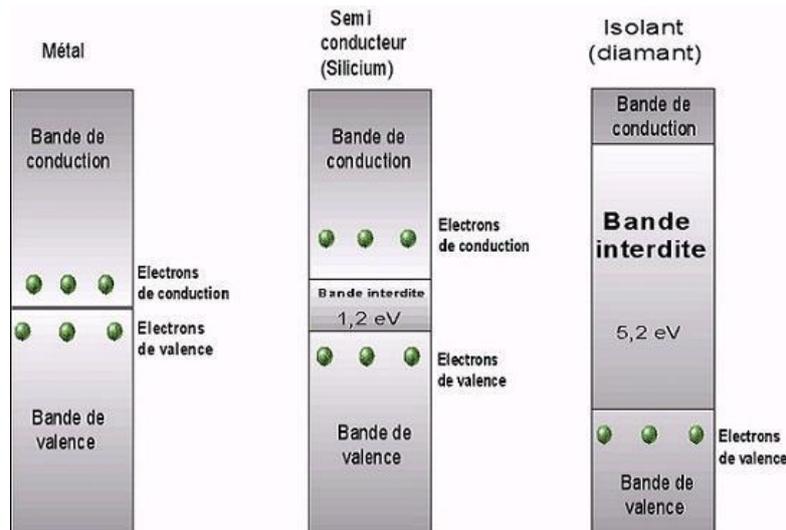


Figure 30 : nature des matériaux [59].

Quel que soit le matériau observé, deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier dans celui-ci. La bande de valence, correspondant à la dernière bande d'énergie saturée en charges du matériau d'une part et la bande d'énergie voisine de la première, appelée la bande de conduction, d'autre part.

La bande de valence bien que riche en charges ne participe pas aux phénomènes de conduction électrique. La bande de conduction, quant à elle, pourra être vide de ses charges, quel que soit le matériau celle-ci travaillant à des températures proche du zéro absolu. C'est cette bande d'énergie qui permet aux électrons d'effectuer des déplacements de charges dans le matériau créant de ce fait un courant électrique dans le solide. La représentation énergétique illustrée sur la figure précédente permet de voir que les matériaux conducteurs, tels que les métaux, ont leurs bandes de valence et de conduction qui se chevauchent facilitant d'autant plus le passage des électrons directement de la première à la seconde et donc la circulation de courant dans le matériau.

Dans le cas des matériaux semi-conducteurs ou isolants, ces deux bandes se trouvent être séparées par une bande interdite, appelée couramment « gap ». La différence entre un semi-conducteur et un isolant se définit par la largeur de cette bande interdite, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives.

Lorsque un semi-conducteur est polarisé en direct, des électrons se déplacent depuis la bande de valence vers la bande de conduction, ils « montent » tandis que d'autre font le chemin inverse et « descendent » vers la bande de valence. Chacun de ces échanges entre la bande de valence et la bande de conduction est appelé recombinaison. C'est ce phénomène, appelé phénomène de recombinaison des porteurs électron-trou, qui est à l'origine de l'émission de photon, donc de lumière, d'une LED. L'énergie du photon généré et les propriétés qui en découlent dépendent du seuil d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction ainsi que du type de matériau semi-conducteur utilisé.

Afin de créer un maximum de lumière, il est possible d'optimiser le nombre de recombinaisons dans le semi-conducteur en ayant recours à des techniques dites de « dopage » similaires à celles utilisées dans le domaine des composants électroniques. De plus, ce processus peut avoir d'autres effets tels que la diminution de la résistance électrique, et donc les pertes associées, la modification de la longueur d'onde d'émission ou encore l'augmentation du nombre de porteurs dans le matériau. Les travaux effectués ici se concentrant plus particulièrement sur l'interaction laser, les liens entre le type de dopage, sa quantité, les effets physiques en découlant et les équations physiques résultantes ne seront pas détaillés ici. Toutefois plusieurs thèses telles que celles développées par F. Tournus ou A. Arnoult [60] [61] [56] décrivent plus particulièrement l'étude et l'interaction de certains de ces phénomènes physiques.



## 2.3 Les Problématiques liées aux LEDs

Comme démontré dans le paragraphe précédent, une LED élémentaire est défini par les performances des matériaux semi-conducteurs la constituant. Ces matériaux, ou alliages de matériaux, sont donc choisis pour avoir de très bonnes performances en émission de lumière. De plus, la taille et le dopage des couches aux propriétés semi-conductrices jouent un rôle important dans les performances. Cette partie rappellera brièvement les choix technologiques historiques effectués pour atteindre des performances optimales dans une zone spectrale précise afin d'aboutir à la création de lumière dite « blanche ».

### 2.3.1 Les principaux matériaux utilisés

La famille de matériaux semi-conducteurs utilisée pour la fabrication d'une LED doit avoir une largeur de bande interdite de l'ordre d'un électron volt (eV). Ceux-ci sont divisés en deux parties ceux dit à gap direct d'une part et ceux dit à gap indirect d'autre part tels que décrits dans le tableau 3 suivant.

Matériau à gap direct	Largeur de la bande (eV)	Matériau à gap indirect	Largeur de la bande (eV)
InSb	0,23	Diamant	5,4
InAs	0,43	Si	1,17
InP	1,42	Ge	0,744
GaAs	1,52	GaP	2,32
GaSb	0,81	AlSb	1,65
CdS	2,58	PbSe	0,165

**Tableau 3 : Largeurs de bande interdite, ou gap, à 0 K [62].**

La notion de gap direct ou indirect est définie par la représentation de la dispersion énergétique du semi-conducteur. L'observation de la représentation du diagramme de l'énergie  $E$  en fonction du vecteur d'onde  $k$ ,  $E=f(k)$  telle qu'en figure 31 permet de définir spatialement les extrema des bandes de conduction et de valence. Ces extrema représentent, pour un semi-conducteur à l'équilibre, des domaines énergétiques où la densité de porteur  $p$ , pour la bande de valence, et de porteur  $n$ , pour la bande de conduction est la plus importante.

Un semi-conducteur sera à gap direct lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à une valeur voisine du vecteur d'onde  $k$ . Inversement, ce semi-conducteur sera à gap indirect lorsque le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont éloignés et prennent des valeurs distinctes sur le vecteur d'onde  $k$ . Dans le cadre de l'émission de lumière, les matériaux à gap direct sont privilégiés tel que l'antimoniure d'indium, InSb, souvent utilisé pour la fabrication de détecteurs infra-rouge, ou l'arséniure de gallium, GaAS, utilisé dans de nombreuses applications.

Ces deux matériaux, dits III-V en rapport avec le nombre d'électron des couches extérieures de valence des atomes les composants, possèdent en effet des extrema de bande proches et situés à des valeurs semblables sur le vecteur d'onde  $k$ . Ainsi la conservation de la quantité de mouvement, illustré par des valeurs de vecteur d'onde  $k$  similaires, permet une probabilité de recombinaison radiative des porteurs supérieure.

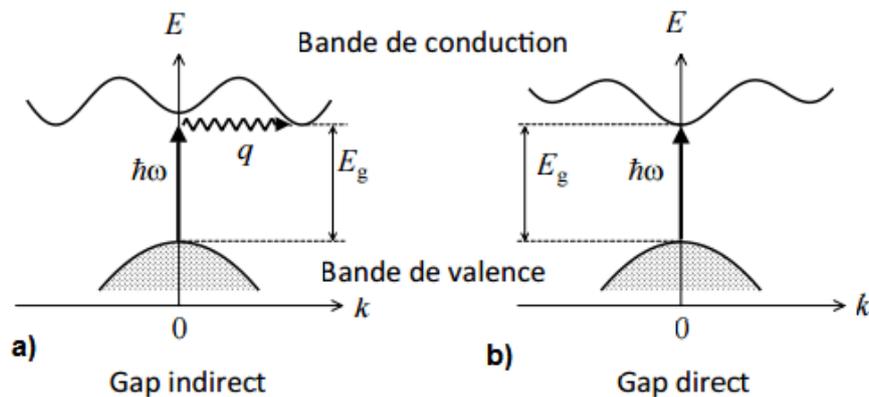


Figure 31 : Diagramme énergétique en fonction du vecteur d'onde  $k$  pour un matériau à gap indirect (a) et à gap direct (b) [63].

Au fil des ans, l'évolution technologique a permis l'apparition de LEDs capables d'émettre sur des longueurs d'ondes variées tel que indiqué dans le tableau 4 si dessous. Si l'émission de lumière du rouge jusqu'au vert c'est avérée assez aisé il fut bien plus difficile d'émettre dans le bleu ou même dans une bande suffisamment large pour produire de la lumière blanche. C'est cette raison qui a limité l'utilisation des LEDs à de simples voyants lumineux pendant des années plutôt qu'en éclairage pur et simple.

Matériaux	Longueur d'onde (nm)	Couleur	Type de gap	Tension à 20 mA (V)
GaAsP	630-660	Rouge	direct	1,8
GaAsP	605-620	Ambre	direct	2
GaAsP:N	585-595	Jaune	direct	2,2
AlGaP	550-570	Vert	direct	3,5
SiC	430-505	Bleu	Indirect	3,6
GaNN	450	Blanc	direct	4

Tableau 4 : Lien entre le type de matériau utilisé et la couleur émise par la LED [64].

### 2.3.1.1 Les premières LEDs bleues et leur conception.

Les premières LEDs émettant de la lumière bleue fut créée à base de séléniure de zinc, ZnSe, et de carbure de silicium, SiC. Ces deux technologies malgré un gap élevé, n'avait pas une efficacité d'émission de lumière satisfaisante, elles furent donc abandonnées. Le premier matériau à présenter des performances intéressantes pour le développement de LEDs bleue fut le nitrure de gallium, GaN. Cependant, la reproductibilité à grande échelle dans la fabrication des cristaux de GaN afin de permettre l'homogénéité du matériau et de ses performances ne fut pas possible immédiatement. Ce fut bien plus tard vers la fin des années 1960 que la découverte et l'utilisation de la technique d'épitaxie en phase vapeur Hydrure, ou HVPE, rendit cela possible [65]. Malgré tout cette technique ne permettait pas de contrôler la rugosité des surfaces.

De ce fait le problème restait entier vis-à-vis de l'hydrogène qui ne pouvait pas être intégré à l'ensemble du matériau de manière homogène et restait donc principalement en surface [66]. Dans les années 1970 l'émergence de nouvelles techniques de croissance cristalline comme l'épitaxie par faisceau moléculaire, ou MBE [67], et l'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques, ou MOVPE [68], permis l'amélioration progressive de la croissance du GaN [69].

À la fin des années 1980, grâce au microscope électronique à balayage, la nouvelle technique d'analyse offrait des agrandissements de bien meilleure qualité. Cela permis aux chercheurs Hiroshi Amano et Isamu Akasaki d'observer que lorsque ils dopaient une couche de GaN avec du zinc le composant obtenu pouvait augmenter son taux d'émission de lumière [70]. Ainsi le zinc s'avérait apporter un meilleur dopage de type P. De la même manière, l'utilisation du Magnésium, Mg, apportait aussi de meilleurs résultats sur le dopage P et donc sur l'émission de lumière [71]. Ce fut cette découverte qui ouvrit la voie à la constitution des premières jonctions PN à base de GaN dédiées aux applications lumineuses.

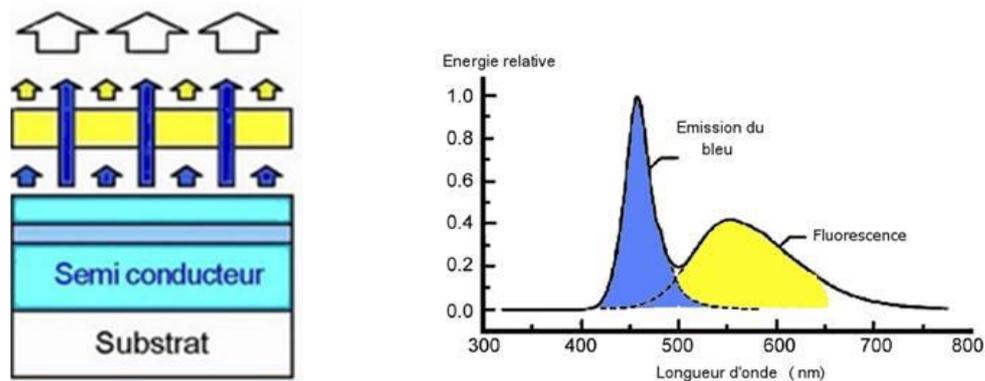
### 2.3.1.2 Les premières LEDs blanches.

La création de lumière blanche par usage d'une LED ou d'un ensemble de LEDs a été réalisée pour la première fois dans les années 1990 pour le rétro-éclairage dans les applications automobiles. Ces premières sources avaient de très faibles puissances d'émission.

À l'heure actuelle, il existe deux manières de produire de la lumière blanche avec des LEDs. La première historiquement s'effectue par la synthèse additive des trois couleurs primaires que sont le rouge, le vert et le bleu. Cette méthode fut possible lorsque les LEDs émettant dans le bleu furent suffisamment améliorées afin d'être reproductibles à grande échelle. Malgré tout la faible largeur spectrale d'émission des LEDs utilisées ne permet pas généralement d'obtenir de très bons résultats une fois groupées pour la création de lumière blanche. Ce type de mélange nommé RGB, pour Red Green Blue en anglais, reste ainsi utilisé pour la création de couleurs particulières ou les animations colorées et peu pour la production de lumière blanche dédiée à l'éclairage.

Un autre frein pour l'utilisation de cette technologie dans l'éclairage vient des matériaux semi-conducteurs, ceux-ci utilisant des technologies différentes en fonction de la couleur recherchée et donc rendant l'association de celles-ci complexifiée par leurs différences de comportement vis-à-vis des conditions de fonctionnement notamment la température et l'alimentation en courant. Cela entraîne des dérives chromatiques voire des diminutions du flux lumineux perceptibles à l'œil nu.

La seconde méthode de production de lumière blanche consiste à émettre des radiations avec l'aide d'un semi-conducteur dans une gamme spectrale donnée puis d'utiliser celle-ci pour exciter un matériau luminophore qui lorsqu'il subit une excitation, transpose la lumière absorbée pour l'émettre dans une autre gamme spectrale. Une solution répandue est par exemple d'utiliser une radiation située dans le bleu et de la coupler avec un luminophore transposant une partie de cette lumière dans le jaune/orange afin que la synthèse des deux se retrouve dans le blanc. C'est cette méthode utilisée actuellement dans de nombreuses technologies LEDs qui sera adaptée dans les chapitres suivant en remplaçant la LED bleue par une diode laser bleue. La figure 32 ci-dessous montre ce phénomène dans le cadre d'une LED bleue couplée à un luminophore jaune simple couche.



**Figure 32 : LED blanches constituées d'un semi-conducteur bleu et d'un luminophore convertissant une partie du bleu en vert, jaunes et rouge [72].**

Le principe de constitution de cette source est que le matériau semi-conducteur de la LED est sélectionné pour pouvoir émettre une radiation bleue autour de 450 nm. Le luminophore, choisi pour transposer la lumière bleue vers le jaune, est déposé directement sur la puce jouant ainsi le rôle de filtre absorbant de la radiation bleue. Le résultat donne une lumière blanche obtenue par le mélange du bleu non absorbé avec le jaune obtenu grâce au luminophore [72]. Ce principe d'absorption des courtes longueurs d'onde et la réémission vers des longueurs d'ondes supérieures fut découvert par George Stokes qui le lia à l'émission de lumière par fluorescence [73]. Une solution similaire consiste à utiliser une LED émettant dans les proches ultraviolets et d'utiliser un luminophore transposant cette lumière dans le bleu avant de reproduire du blanc [74] [75].

Enfin la dernière utilisation de cette technologie est donc celle utilisée dans ce manuscrit, utilisant une diode laser en lieu et place d'un semi-conducteur. Selon Shuji Nakamura [76], cette technologie, utilisant la lumière laser, représente le futur des applications de l'éclairage grâce à ses avantages par rapport aux systèmes LED, OLED ou OLET. En effet l'utilisation d'une diode laser offre un meilleur contrôle en température, celle-ci étant beaucoup moins sujette à l'emballement thermique symptomatique des LEDs. Un autre avantage est qu'à puissance optique équivalente, les diodes laser sont moins gourmandes en énergie. Enfin elles jouissent d'une meilleure stabilité chromatique. Ainsi elles commencent à apparaître dans l'industrie, par exemple dans l'automobile [77].

Malgré cela les LEDs restent prédominantes à l'heure actuelle du fait qu'elles couvrent une gamme de longueur d'onde très large et sont donc capables de constituer de nombreux types de luminaires. La figure 33 montre la variation du spectre d'émission en fonction de l'absorption plus ou moins importante du luminophore, ceci permettant de varier la couleur résultante.

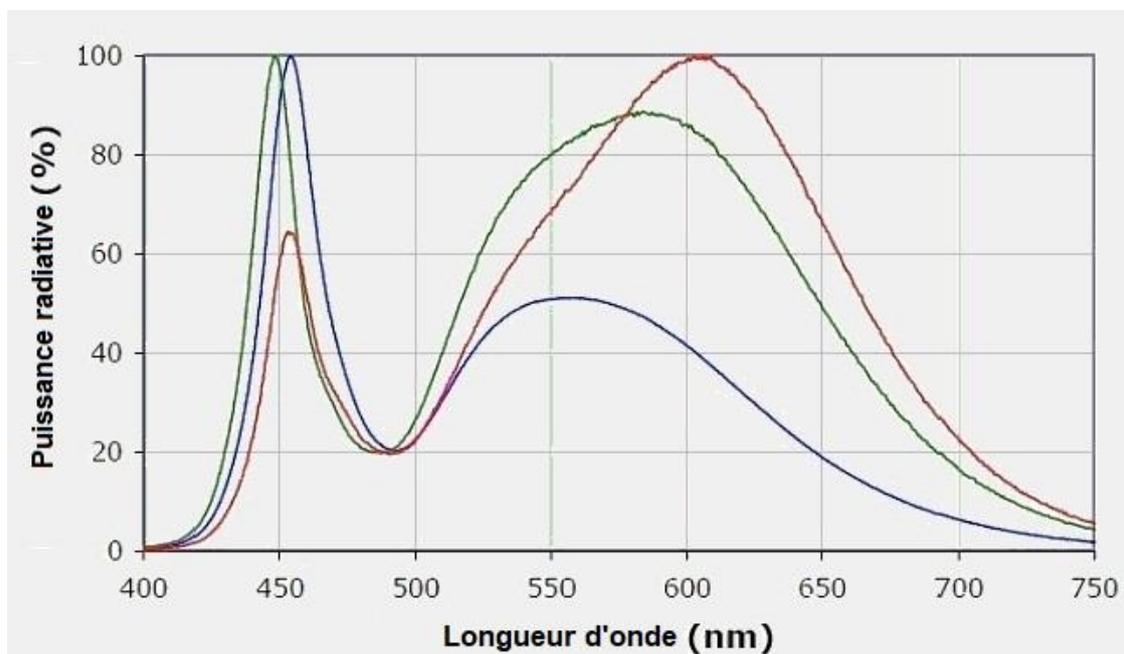


Figure 33 : spectre d'émission d'une LED en fonction de l'absorption du luminophore [75].



## 2.4 Le laser : des origines aux diodes laser.

### 2.4.1 Le pompage optique et la création du premier LASER.

Le laser trouve ses origines dans diverses expériences et technologies comme l'expérience des fentes de Young ou le Maser. Celles-ci seront abordées plus en détail dans les annexes de ce manuscrit. Ce chapitre commencera donc au premier LASER en tant que tel.

La figure 34 ci-dessous montre les différents modes de pompage optique liés au laser. La partie gauche montre le premier laser à rubis, ou laser de Maiman, fabriqué par Théodore Maiman en 1960. Ce laser était réalisé à l'aide d'un rubis dopé avec des ions Chrome. Le rubis s'avère être un cristal de corindon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) où quelques ions de chromes sont substitués aux atomes d'aluminium dans un rapport de 1/2000 [82].

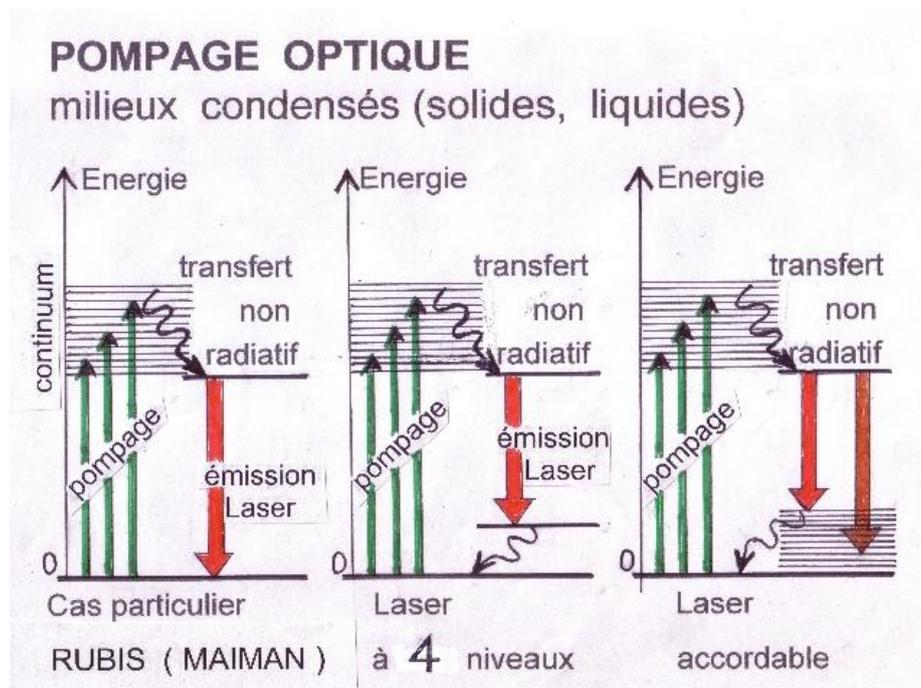


Figure 34 : Pompage optique de différents lasers [82].

Le pompage optique est déclenché par un flash de lumière blanche. Les ions Chrome absorbent les radiations jaunes, vertes et violettes du flash incident et changent de niveau énergétique. Grâce à cela c'est une grande partie du spectre lumineux qui se trouve utilisé pour faire passer les atomes à des niveaux électroniques plus élevés, appelés continuum. Grâce à la largeur de bande obtenue par le cristal dopé, seuls 10% de la lumière incidente suffisent à réaliser l'inversion de population. Les atomes situés dans le continuum redescendent spontanément par échange d'énergie avec les vibrations thermiques du cristal jusqu'à atteindre rapidement le bas de la bande énergétique. C'est de cette manière qu'est réalisée l'inversion de population.

Le laser à rubis reste malgré tout un cas particulier. En effet pour la plupart des lasers, l'inversion de population est réalisée entre un niveau très excité et un niveau excité plus bas n'étant pas l'état fondamental comme le montrent les deux autres cas de la figure 40. Le laser accordable utilise lui des colorants créés par les chimistes afin de pouvoir faire varier les longueurs d'onde [83].

## 2.4.2 La composition d'un laser.

Grâce à l'émission stimulée, il est possible par pompage de réaliser une inversion de population, de sorte que les atomes amplifient la lumière. Cependant, un laser est une source de lumière et non pas un amplificateur. Pour réaliser un laser, il faut donc transformer cet amplificateur de lumière en oscillateur. Cette transformation peut être obtenue en reliant la sortie d'un amplificateur à l'une de ses entrées ce qui va produire l'oscillation du système. Pour déclencher cette oscillation c'est l'émission spontanée qui sera utilisée comme amorce. Afin de renvoyer la lumière amplifiée dans le milieu amplificateur il faut réaliser, grâce à un jeu de miroirs, une cavité optique. La figure 35 suivante montre l'exemple d'une cavité optique laser constituée de quatre miroirs dite cavité en anneau.

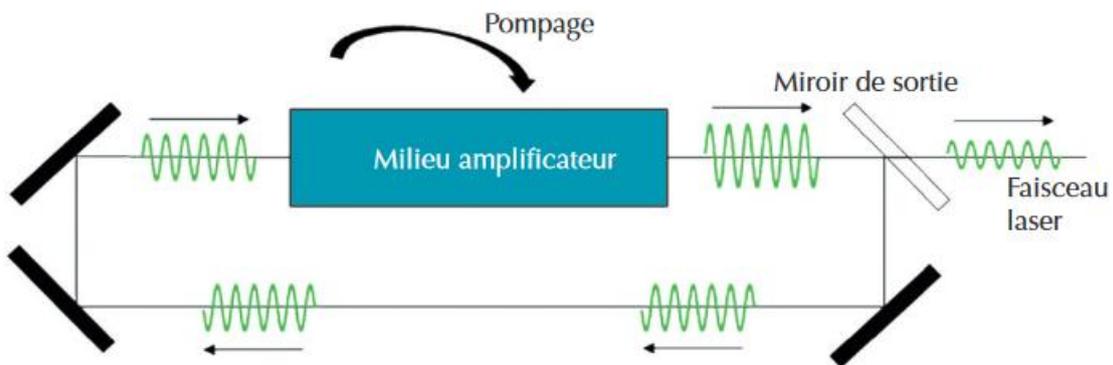


Figure 35 : cavité optique en anneau [84].

La cavité laser la plus simple à réaliser est constituée de deux miroirs se faisant face. Cette architecture est appelée cavité « Fabry-Perot ». Dans une telle cavité, un des miroirs réfléchit totalement la lumière située à la longueur d'onde considérée tandis que l'autre, appelé miroir de sortie transmet une fraction de la puissance lumineuse présente dans la cavité. Cette onde constitue le faisceau laser.

La lumière, réfléchiée successivement par les deux miroirs, fait des allers-retours dans la cavité. Afin de renforcer l'onde lumineuse à chaque passage dans l'amplificateur il est nécessaire que les ondes soient en phase. Pour cela le chemin optique dans la cavité, correspondant à un aller-retour, doit être égal à un nombre entier de fois la longueur d'onde utilisée [84]. Cette condition de résonance est donnée par la formule suivante :

$$2L = n\lambda, \text{ soit } L = n\lambda/2$$

Où  $L$  est la distance séparant les deux miroirs,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $n$  un nombre entier. Ainsi pour une longueur  $L$  fixée, seules les longueurs d'onde vérifiant la formule précédente pourront être présentes dans le faisceau laser. Ces longueurs d'ondes associées aux valeurs de  $n$  sont appelées modes longitudinaux de la cavité. L'écart en fréquence entre deux modes voisins et donc défini par la formule ci-dessous :

$$2.2 \quad \Delta\nu = c/2L$$

Avec  $c$  étant la célérité de la lumière. En pratique, au moins un des miroirs de la cavité doit être concave afin de concentrer la lumière latéralement pour qu'elle soit recueillie entièrement par les miroirs et limiter ainsi les pertes par diffraction. Par conséquent, l'onde lumineuse dans la cavité et le faisceau émis ne sont pas des ondes planes et le rayon du faisceau varie au cours de sa propagation. Ce rayon prend, dans la cavité une valeur minimale, appelée col du faisceau ou waist et notée  $w_0$ . Cette valeur dépend du rayon de courbure des miroirs de la cavité et autour de la position de  $w_0$  l'onde lumineuse est peu divergente, sa taille transverse ne variant quasiment pas. A l'inverse, loin du col, l'onde lumineuse est assimilable à une onde sphérique : le faisceau est divergent. Dans la cavité laser il est préférable de placer le milieu amplificateur autour de la position de  $w_0$  afin d'obtenir le maximum d'émission stimulée car c'est à cet endroit que la densité d'énergie est la plus importante comme le montre la figure 36.

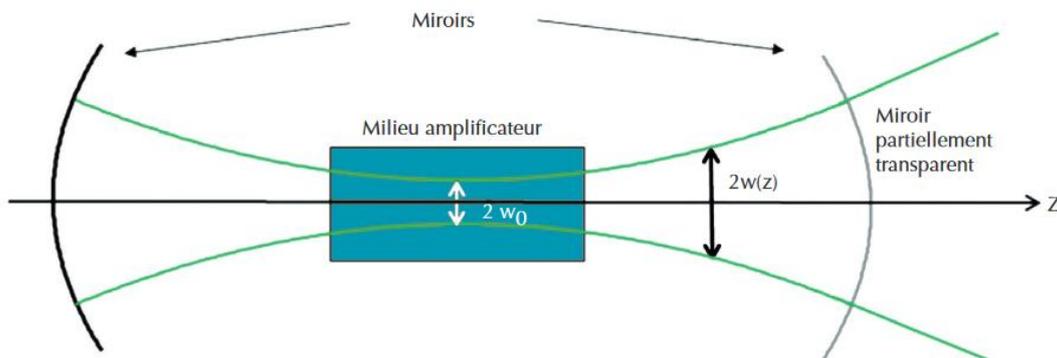


Figure 36 : géométrie du faisceau dans la cavité laser [84].

Du fait de la géométrie du faisceau le rayon de celui-ci évolue, dans la cavité ou à l'extérieur, au cours de la propagation le long de l'axe  $z$  suivant la relation suivante :

$$2.3 \quad w(z) = w_0[1 + (z/Z_R)^2]^{1/2}$$

La longueur de Rayleigh, notée  $Z_R$ , définit la distance à partir du col sur laquelle le rayon du faisceau est passé de  $w_0$  à  $\sqrt{2} w_0$ . Cette longueur est donnée par la relation :

$$2.4 \quad Z_R = \pi w_0^2 / \lambda$$

Avec  $\lambda$  étant la longueur d'onde utilisée. Cette relation est semblable à l'expression de la diffraction de la lumière par un diaphragme de diamètre  $2w_0$ . Le faisceau transmis par le miroir de sortie a les mêmes caractéristiques que celles du faisceau incident sur ce miroir. L'avantage de ces faisceaux est qu'ils peuvent se propager sur de grande distance, par exemple un laser hélium-néon possédant une longueur d'onde de 633nm aura, pour un col de faisceau de 600 $\mu$ m, une longueur de Rayleigh de 2m. Cela signifie que sur une distance de propagation de 2m le rayon du faisceau restera quasiment constant. Toutefois il est impossible d'avoir, à la fois, un faisceau très directif et de rayon très faible.

En effet plus le faisceau est focalisé, grâce à des miroirs concaves de faibles rayons de courbure, plus  $w_0$  est faible mais le faisceau diverge ensuite plus rapidement la longueur de Rayleigh étant elle aussi très faible. La solution pour pallier à ce problème est d'utiliser une lentille extérieure pour focaliser le laser : le diamètre minimum du faisceau qui peut être ainsi obtenu est limité par la diffraction et se trouve de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde utilisée.

Au final un laser est constitué de trois éléments distincts. Tout d'abord un milieu amplificateur, pompé optiquement dans un état où l'émission stimulée est possible et ceci dans une gamme de fréquences caractéristiques du milieu. Ensuite une source d'énergie assurant le pompage optique du milieu amplificateur. Et enfin une cavité optique permettant le bouclage du dispositif et imposant au faisceau émis ses caractéristiques spatiales, sa direction et sa divergence, et temporelles, son spectre de fréquences ou modes. Quant à la partie du faisceau qui s'échappe de la cavité : elle constitue l'émission du faisceau laser.

### 2.4.3 Les conditions d'oscillation laser.

Dans un milieu absorbant, l'intensité lumineuse est atténuée lors de la propagation, par un facteur de la forme  $e^{-Kl}$ , où K est le coefficient d'absorption du milieu, proportionnel à la densité d'absorbant, et l, l'épaisseur du milieu traversé. De même au sein du laser le rapport entre l'énergie de l'onde lumineuse après et celle avant le passage dans le milieu, appelé gain de l'amplification, se définit par :

$$2.5 \quad G = e^{(\alpha l)}$$

Avec  $\alpha$  donné par

$$2.6 \quad \alpha = \sigma(\nu) (n_2 - n_1).$$

$\sigma(\nu)$ , la section efficace d'interaction entre les atomes et l'onde, dépend de la fréquence  $\nu$ .

En présence d'inversion de population  $n_2 > n_1$  donc  $\alpha$  est positif et le gain résultant est supérieur à 1. Pour que l'oscillation laser s'enclenche il faut que pour chaque passage dans le milieu amplificateur, le gain soit supérieur aux pertes de la cavité : cela définit la condition d'oscillation. Les pertes dans la cavité sont dues principalement à la transmission du miroir de sortie. D'autres pertes, étant elles à minimiser, peuvent se produire : absorption, diffusion diffraction voire même réflexion aux interfaces.

En considérant, comme précédemment, une cavité formée de deux miroirs, dont un seul n'est pas totalement réfléchissant, le gain global sur un tour complet dans la cavité se calcule par le produit du gain  $G$  et du coefficient de réflexion  $R$  de ce miroir. Pour que l'oscillation démarre il faut donc que :

$$2.7 \quad GR \geq 1$$

Une égalité donnant le seuil d'oscillation. En dessous du seuil, l'intensité de l'onde dans la cavité est négligeable, au-dessus du seuil un faisceau laser est émis. Malgré tout, l'intensité lumineuse dans la cavité, et celle émise par le laser à travers son miroir de sortie ne croissent pas indéfiniment au cours du processus d'amplification. En effet, lorsque l'intensité augmente, des phénomènes de saturation ont pour effet de diminuer le gain d'amplification.

En régime stationnaire, le point de fonctionnement du laser est atteint pour une intensité lumineuse dans la cavité telle que le gain égale les pertes. Ainsi la condition d'oscillation dépend de la longueur d'onde, par l'intermédiaire du gain de milieu amplificateur, l'amplification par émission stimulée n'étant possible que dans la gamme de fréquences caractéristique du milieu. Cependant elle dépend aussi des coefficients de réflexion des miroirs. De plus, la cavité optique n'est résonante que pour certaines longueurs d'onde bien particulières, associées aux modes longitudinaux de la cavité. Ainsi plusieurs de ces modes peuvent satisfaire la condition de gain supérieur aux pertes, chacun pour sa propre longueur d'onde. Dans ce cas le laser fonctionne en multimode : il émet plusieurs fréquences voisines, séparées de  $c/2L$ . Au contraire, si un seul mode vérifie la condition d'oscillation, le laser fonctionne en monomode et n'émet qu'une seule fréquence [85]. C'est ce dernier fonctionnement qui est privilégié dans le cadre du couplage diode laser / luminophore.

## 2.4.4 La diode laser.

Les diodes Laser reposent sur des technologies bien différentes dépendant de la couleur émise. En fonction de la couleur voulue, le principe sera différent : diode laser simple ou diode laser de pompage et cristaux spécifiques. Electriquement, une diode laser s'alimente comme une LED. Comme toute diode, elle est polarisée. Le courant qui circule dans la diode laser doit être maîtrisé avec une plus grande précision que pour une LED. En effet, une pointe de courant, même très brève, ou une décharge d'électricité statique seront fatales à une diode laser. De plus celle-ci ne supportera pas plus de 2 ou 3V en tension inverse rendent le contrôle du courant encore plus primordial. De la même manière que pour une LED, la caractéristique courant-tension fait qu'il s'établit une tension aux bornes de la diode laser qui varie assez peu avec le courant. La diode laser doit donc être contrôlée en courant. La diode laser se différencie néanmoins de la LED par son courant de seuil, environ 10 à 25 % du courant maximum en dessous duquel l'amorce du laser n'est pas réalisée [86].

Les caractéristiques d'une diode laser sont proches de celles d'un laser conventionnel tel que montré précédemment, cependant, la plus faible longueur de la cavité, quelques centaines de micromètres au lieu de quelques dizaines de centimètres, entraîne une plus grande divergence du faisceau et des raies d'émission plus éloignées les unes des autres. Ce phénomène facilite la création de lasers monomodes par filtrage. De plus dans la diode laser Les états énergétiques se répartissent dans la structure de bandes du semi-conducteur à la place d'états énergétiques bien définis, impliquant l'émission de raies moins fines. Les avantages de cette technologie sur les lasers classiques sont sa taille réduite, sa facilité de modulation à des fréquences élevées, ses faibles tensions de service et sa puissance consommée grâce à des rendements de l'ordre de 30 % au lieu de 3 % pour les autres types de laser [87].

Une diode laser est constituée d'une jonction de semi-conducteurs de la même façon qu'une diode/LED classique. Elle possède trois zones caractéristiques : une couche de confinement de type n, une zone active et une couche de confinement de type p. Les couches de confinement permettent d'optimiser l'utilisation du courant dans la diode et d'augmenter le rendement. La zone active est formée d'un guide d'onde encadrant le lieu de l'émission laser : matériau massif ou quantique, puits, boîtes ou fil par exemple. Lorsque cette diode est polarisée en direct, elle laisse passer un fort courant qui peuple la bande de conduction et peut réaliser l'inversion de population.

En réalité, une couche intermédiaire d'indice optique supérieur joue le rôle de guide optique. Les extrémités sont clivées et donnent des faces parfaitement planes jouant le rôle de miroirs semi-réfléchissants, créant la cavité résonnante. La séparation entre le semi-conducteur d'indice 3,5 environ et l'air d'indice 1 possède ainsi un coefficient de réflexion de 30 %. Ce coefficient peut être diminué sur les deux côtés par l'application d'un revêtement anti-réfléchissant afin d'obtenir une puissance de sortie plus importante. Suivant le domaine d'application, une lentille de focalisation peut être ajoutée. La puce optoélectronique peut, dans certain cas, être montée sur un radiateur puis sur un module Peltier. Le contact supérieur est connecté à la source de courant par un procédé de bonding. La figure 37 ci-dessous montre la structure d'une diode laser.

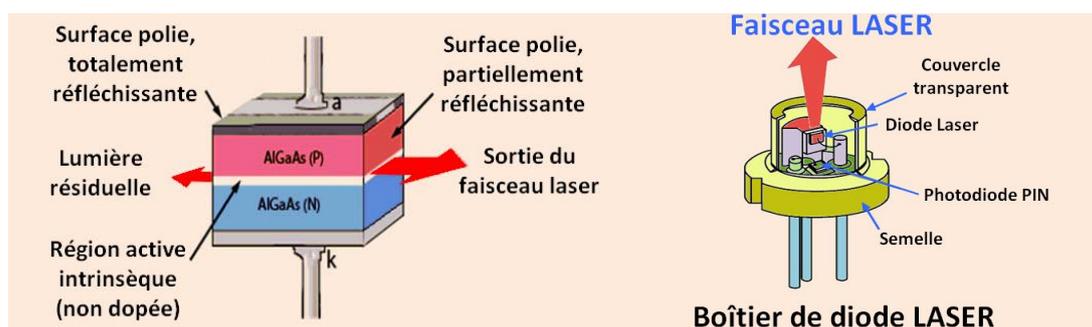


Figure 37 : structure d'une diode laser [87].

## 2.5 Les luminophores.

### 2.5.1 La photoluminescence.

Certains corps, suite à une absorption d'énergie, ont la capacité de retourner à leur état fondamental en restituant une partie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Ces corps sont dit luminescents. Le phénomène de luminescence est souvent opposé au phénomène d'incandescence où l'émission lumineuse provient d'une excitation thermique. Il existe une large gamme de sources d'excitation pouvant induire de la luminescence comme par exemple, l'électroluminescence vue précédemment dans les LEDs. Il existe également la cathodoluminescence où le matériau devient luminescent après avoir été excité par un faisceau d'électrons. Enfin il y a également la photoluminescence, où l'absorption d'une radiation électromagnétique conduit à l'excitation du matériau, de molécules ou encore d'ions qui vont émettre en retour des photons de plus basses énergies. C'est cette dernière qui est utilisée dans le cadre des luminophores. Lorsqu'un corps est excité par absorption de lumière différents chemins de désexcitation s'offrent à lui pour retourner à son état fondamental, état qui est statistiquement le plus peuplé à température ambiante, ces chemins peuvent être radiatifs ou non radiatifs. Lorsque la désexcitation est radiative, il y a émission de rayonnement lumineux tandis que la voie non radiative s'accompagne d'une dissipation d'énergie sous forme de chaleur par génération de vibrations de réseau et émission de phonons. Le phénomène de photoluminescence peut être séparé en deux catégories dépendant du temps pendant lequel le corps luminescent reste dans son état excité : fluorescence et phosphorescence. La fluorescence est une émission radiative spontanée depuis les niveaux électroniques de l'état excité avec conservation de la multiplicité de spin. Les durées de vie correspondantes ont pour ordre de grandeur  $10^{-9}$  s à  $10^{-6}$  s. Alors que la phosphorescence est un processus plus complexe avec des durées de vie allant de  $10^{-6}$  s à 1 s voire plusieurs heures dans certains cas [88]. Il est nécessaire de distinguer les mécanismes de la photoluminescence généralement rencontrés dans les solides de la luminescence moléculaire : atomes isolés, molécules, ions.

#### 2.5.1.1 Les matériaux luminescents solides.

Le mécanisme de luminescence dans les solides peut être décrit par un schéma de bandes d'énergies telles que définies précédemment. Dans un isolant pur, un cristal parfait, il y a deux bandes d'énergie bien définies : une bande de valence presque entièrement remplie et une bande de conduction presque entièrement vide. Les deux bandes d'énergie sont séparées par une bande interdite exempte de niveaux énergétiques. Des électrons peuvent migrer de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi des électrons « libres » dans la bande de conduction et des trous « libres » dans la bande de valence. La luminescence peut être d'origine intrinsèque ou extrinsèque. La luminescence intrinsèque est généralement issue de l'émission radiative d'états excités non conducteurs ou excitons célibataires alors que la luminescence extrinsèque est basée sur des défauts ponctuels : dopants, impuretés, lacune ou étendus : dislocation, dans le cristal.

Les dopants ou les impuretés occupent dans le cristal des positions interstitielles ou de substitutions et lorsqu'elles sont actives en luminescence, elles sont appelées centres luminescents. La présence d'imperfections dans le cristal comme des impuretés et/ou des défauts dans la maille, introduit des niveaux électroniques localisés permis dans la bande interdite. La position de ces niveaux dépend de la nature des défauts, et de la matrice hôte comme le montre la figure 38. Ces niveaux peuvent être de plusieurs sortes : Soit des niveaux de recombinaisons ( $h^+/e^-$ ) pouvant être des centres luminescents. Soit des niveaux métastables c'est-à-dire des pièges à électrons  $e^-$  ( $Pe^-$ ) ou à trous  $h^+$  ( $Ph^+$ ).

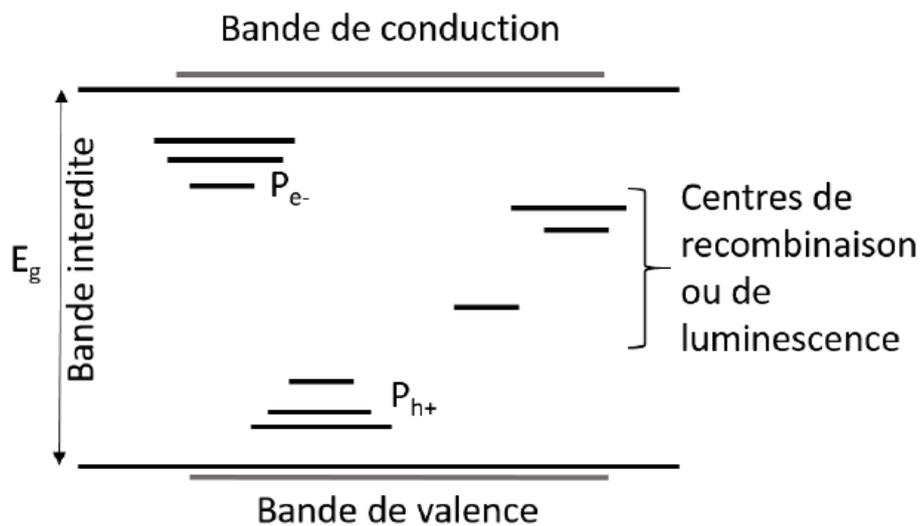


Figure 38 : niveau d'énergie dans un isolant [89].

Les niveaux fondamentaux, GS, et excités, ES, des centres luminescents peuvent être isolés énergétiquement. L'excitation des centres peut se faire par absorption d'énergie  $h\nu$  comme le montre la figure 39-a, via l'intervention de porteurs libres issus des bandes permises de conduction : Figure 39-b et de valence ou via un transfert d'énergie : Figure 39-c.

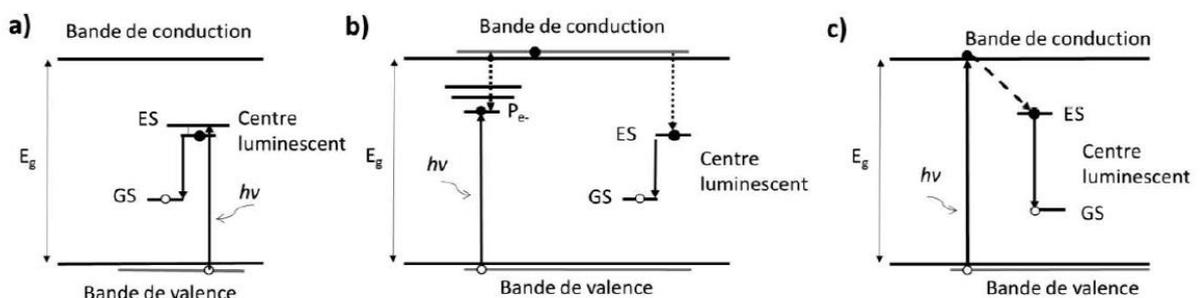


Figure 39 : schéma de différentes voies d'excitation d'un centre luminescent [89].

L'exemple le plus simple de piège à électrons est un centre luminescent nommé F, le F venant de « Fabre » en allemand signifiant « couleur » d'où le nom de centres colorés. Ce centre F est constitué d'une lacune d'oxygène dans le réseau cristallin.

Pour maintenir la neutralité électrique, pour chaque électron qui est piégé dans  $Pe^-$ , un trou est produit. Ce dernier peut être piégé dans un  $Ph^+$ , alors un trou piégé est formé. Ces états électroniques peuvent être remplis ou vides. Par exemple, une lacune d'oxygène peut être vide ou occupée par un ou plusieurs électrons. [89]. La matrice hôte au sein de laquelle sont dispersés les défauts possède plusieurs rôles : premièrement elle permet aux centres luminescents d'être fixes, statistiquement dispersés et mécaniquement isolés. Ensuite elle peut également jouer le rôle d'antenne en absorbant l'énergie d'excitation et en la transférant ensuite aux centres luminescents. Enfin, lors de la désexcitation, des interactions entre le système électronique des centres luminescents et les vibrations de la matrice entraînent des modifications transitoires de l'énergie de l'électron dans son retour vers l'état fondamental [90].

Même si le potentiel périodique issu de l'arrangement à longue distance des réseaux cristallins est généralement étudié et pris comme modèle, il y a des preuves expérimentales et théoriques que le même modèle de bandes peut s'appliquer aux matériaux amorphes et vitreux [91]. De plus les détails des structures de bandes sont principalement déterminés par le potentiel dans la maille ou ordre local, plutôt que par l'ordre à longue distance. Vu que les impuretés et imperfections dominent les phénomènes de luminescence, l'ordre local est suffisant pour permettre de bien définir les niveaux d'énergie de ces systèmes et en particulier dans le cas de liens forts. Malgré tout, les mécanismes d'excitation qui impliquent des transports de charge ou d'énergie sont eux influencés par la perte d'ordre à longue distance. Dans les verres, le manque de périodicité dans l'arrangement atomique multiplie le nombre d'environnements énergétiques différents au sein duquel les centres luminescents peuvent se trouver. Ceci entraîne en général, un élargissement dit « inhomogène » des bandes de luminescence en comparaison des mêmes matériaux à l'état cristallin. En outre, il est possible de produire une grande variété de centre luminescents en partant de groupes énergétiquement isolés jusqu'aux ions dont la luminescence est influencée par l'anisotropie des forces de liaisons les entourant [91].

Dans le verre ou d'autres matériaux similaires pouvant constituer un luminophore plusieurs types de défaut sont généralement rencontrés : En premier, des atomes neutres métalliques isolés suite à une dissociation thermique d'un oxyde ou d'un sel. Du fait qu'ils sont isolés énergétiquement dans la matrice, ils ne peuvent pas perdre d'énergie par dissipation de chaleur [92]. Ensuite, il peut exister des molécules organiques isolées énergétiquement dans la matrice vitreuse qui conservent leurs propriétés de photoluminescence. Les motifs cristallins de quelques unités atomiques, nanocristaux ou quantum dots, qui sont également identifiés comme des entités moléculaires à cause du caractère covalent de leurs liaisons. Pour être des centres luminescents, ils doivent être isolés énergétiquement car plus ils grossissent plus l'intensité de photoluminescence diminue [93]. Enfin certains ions participant à la structure vitreuse peuvent produire de la photoluminescence : des groupes individuels de cations ou d'anions, où le cation est entouré d'un nombre significatif d'ions d'oxygène, peuvent avoir un caractère luminescent. Dans ce cas, les ions se trouvant dans certains états quantiques vont présenter une émission de photoluminescence lorsqu'ils sont correctement activés [91].

De plus des modifications dans la composition des verres peuvent jouer sur l'asymétrie, l'intensité du champ cristallin, les états d'oxydation ou d'agrégation des centres luminescents. Ces modifications influencent la longueur d'onde de photoluminescence et son intensité. Lorsque des modificateurs de réseaux sont introduits dans la matrice vitreuse, ces derniers viennent prendre part au réseau minéral. Ils sont reliés aux ponts oxygène avec des ions formateurs de réseau de la matrice. Ces changements entraînent une perte de symétrie dans l'environnement des centres luminescents pouvant modifier leur état d'oxydation. Ceci peut entraîner aussi bien une augmentation de la luminescence, qu'une diminution.

### 2.5.1.2 La photoluminescence moléculaire.

La luminescence, dans des atomes isolés, des composés moléculaires ou des ions, est basée sur le modèle électronique des niveaux énergétiques de larges molécules décrit par le diagramme de Perrin-Jablonski illustré sur la figure 40 suivante :

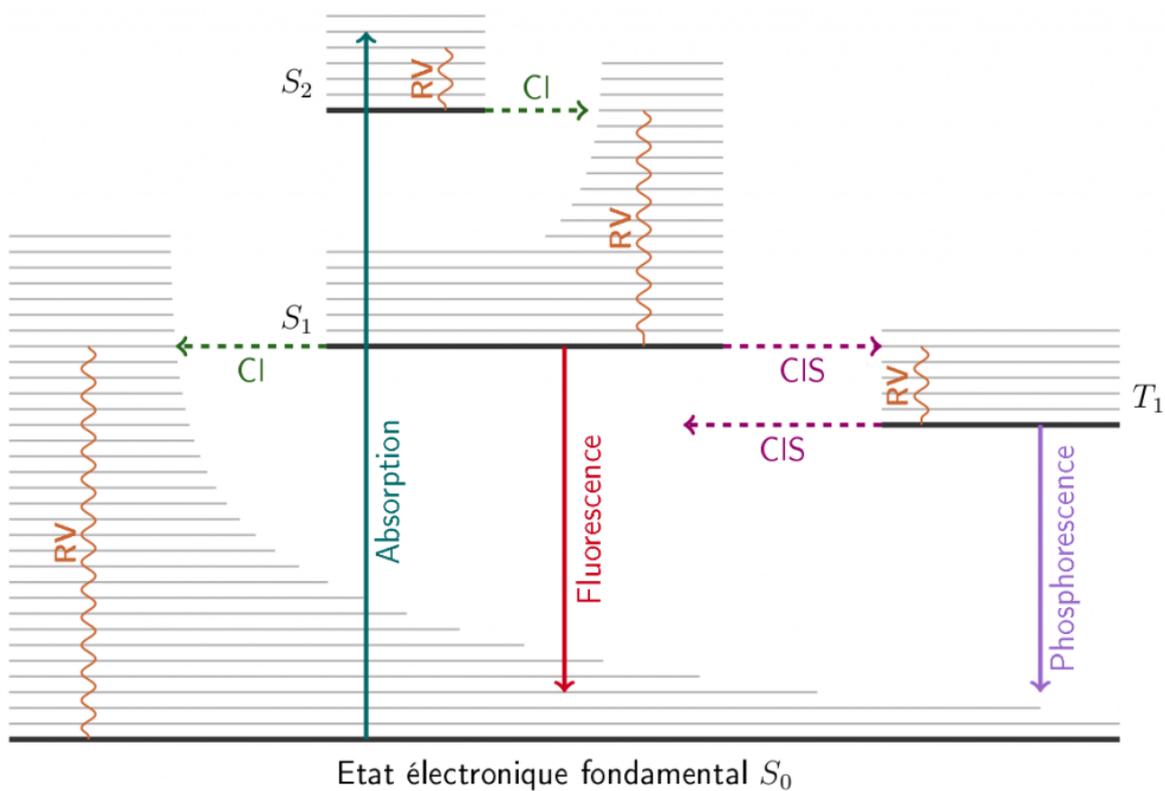
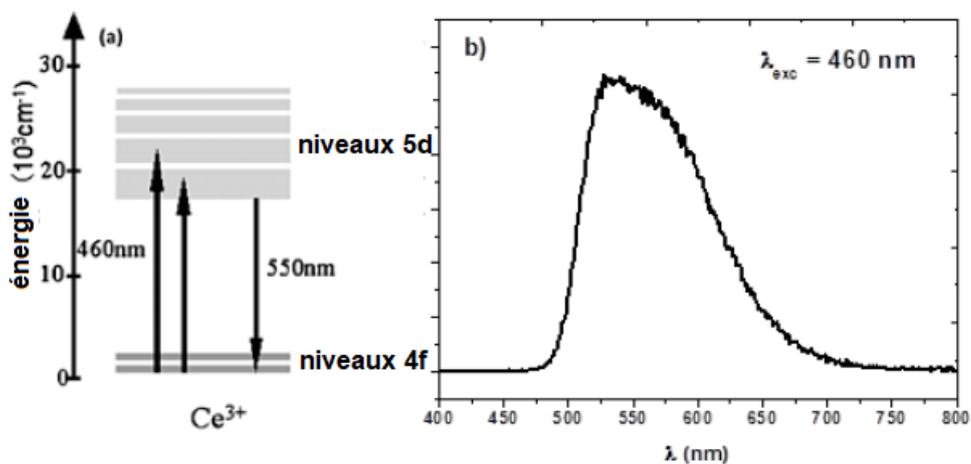


Figure 40 : diagramme de Perrin-Jablonski [95].

Lorsque la matière absorbe l'énergie d'un photon, un des électrons de valence est excité de l'état électronique fondamental,  $S_0$ , vers un état électronique de plus haute énergie,  $S_1$ ,  $S_2$  ou  $S_n$ , sans changement d'état de spin, appelé état singulet. Cette transition est très rapide, de l'ordre de  $10^{-15}$  s. Lorsque l'électron est dans l'état excité, dans un premier temps il y a perte d'énergie cinétique par relaxation vibrationnelle, RV, entre les niveaux d'énergie vibrationnels de l'état excité de la molécule.

Cette relaxation vibrationnelle est un processus non-radiatif, l'électron retourne au niveau énergétique vibrationnel S1 de l'entité chimique instantanément sans émission de radiation [94]. Dans l'état excité de haute énergie, l'entité excitée peut perdre de l'énergie par différents processus de relaxation. Tout d'abord, le retour à l'état fondamental peut se faire via l'émission d'un photon par fluorescence. Ensuite, l'énergie peut être transférée vers un autre niveau électronique singulet par conversion interne, IC. La probabilité de ce processus dépend de la durée de vie de l'électron excité dans ce nouvel état. D'un point de vue électronique, la fluorescence est un processus assez lent de l'ordre de  $10^{-9}$  à  $10^{-7}$  s et se produit avec la conservation de l'état de spin électronique. L'énergie de fluorescence est toujours inférieure à l'énergie d'absorption à cause de la perte induite par la relaxation vibrationnelle. La différence d'énergie entre l'absorption et l'émission est appelée le déplacement de Stokes.

Dans le cas de transitions permises, c'est-à-dire entre les niveaux d'énergie de parité différente selon la règle de Laplace, les spectres d'absorption et d'émission sont élargis dû à la combinaison des transitions radiatives de l'état excité électronique de plus basse énergie et des différents états électroniques par relaxation vibrationnelle non radiative [95]. C'est ce que l'on observe pour les molécules organiques et certains ions de terres rares, comme par exemple pour les ions  $\text{Eu}^{2+}$  ou  $\text{Ce}^{3+}$ , tel que illustré dans la figure 41 suivante, qui ont des bandes d'émission larges.



**Figure 41 : Schéma des niveaux d'énergie de l'ion  $\text{Ce}^{3+}$  dans une matrice de YAG et spectre d'émission du YAG :  $\text{Ce}^{3+}$  pour une longueur d'onde d'excitation de 460 nm [96].**

Il peut également y avoir une dissipation d'énergie entre des états électroniques excités de différentes multiplicités. Ceci est appelé un processus de conversion intersystème ou CIS. Dans ce cas, le spin électronique passe d'un état singulet à un état triplet, de S1 vers T1 dans la figure 46. Dans l'état triplet, les états excités des molécules organiques ont un temps de vie plus élevé de l'ordre de  $10^{-6}$  à 10 s voire plus, avant de retourner à l'état fondamental [96]. Une émission de faible intensité apparaît alors, émission qui peut durer plusieurs minutes après l'excitation. Généralement, la transition provenant de l'état singulet est une transition permise :  $\Delta S = 0$ , par conséquent elle peut être mesurée même à température ambiante.

Par contre, la phosphorescence est généralement difficile à observer à température ambiante car la transition est une transition interdite de spin à cause des règles de sélections électroniques :  $\Delta S = 1$ . Cependant, les transitions interdites peuvent être autorisées grâce au couplage spin-orbite ou au couplage vibrationnel.

Dans le cas des ions de terres rares, tels que  $\text{Eu}^{3+}$  et  $\text{Tb}^{3+}$ , les transitions observées sont des transitions interdites :  $\Delta S = 1$ . Celles-ci deviennent autorisées par l'influence du champ cristallin de la matrice sur les ions. Elles ont généralement des durées de vie de l'ordre de  $10^{-6}$  à  $10^{-3}$  s, avec des bandes d'émission très étroites comme illustré sur la Figure 42 [97].

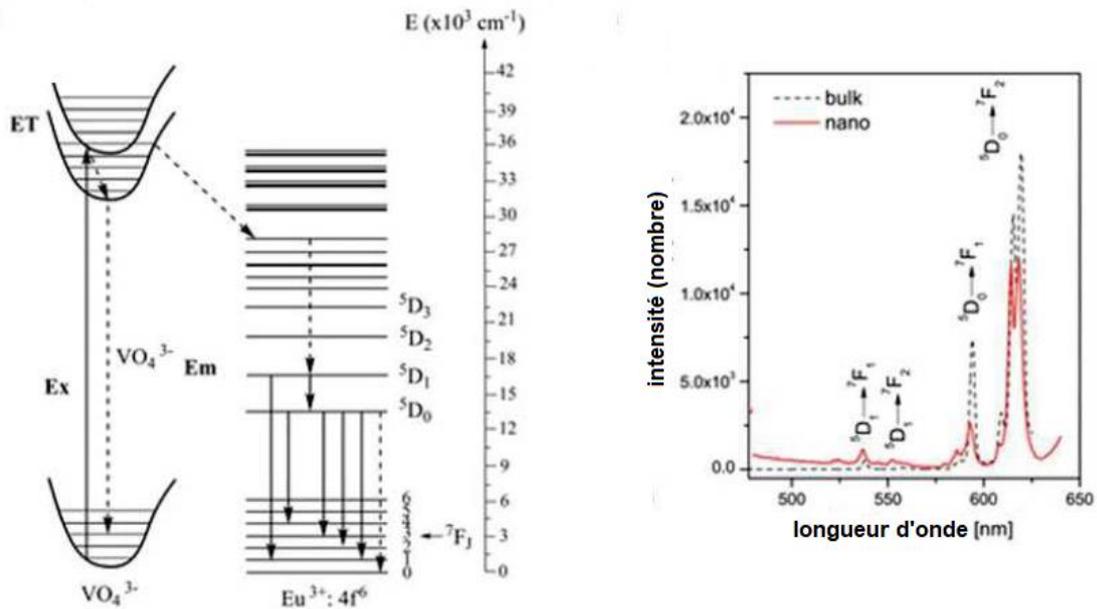


Figure 42 : Schéma des niveaux d'énergie de l'ion  $\text{Eu}^{3+}$  dans une matrice vanadate et spectre d'émission du  $\text{GdVO}_4 : \text{Eu}^{3+}$  pour une longueur d'onde d'excitation de 330 nm [97].

## 2.5.2 Luminophores basés sur des défauts de structure.

Cette partie se concentre sur les composés luminescents sous excitation dans le proche ultraviolet et dans le bleu dont la luminescence n'est pas basée sur du dopage par des métaux de transition ou des terres rares. La première partie se concentrera sur le cas des matériaux cristallins puis la seconde s'attardera sur les matériaux amorphes, ceux-ci étant actuellement les plus utilisés dans l'éclairage et dans la suite de ce manuscrit.

### 2.5.2.1 Les composés cristallins.

Les composés de la famille des tungstates tels que  $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{SrWO}_4$  et  $\text{BaWO}_4$ , ont de larges bandes d'émission de photoluminescence entre 450 et 700 nm sous irradiation à 350 nm. Des calculs de mécanique quantique basés sur de la théorie fonctionnelle de densité, permettent d'appuyer l'hypothèse du mécanisme de photoluminescence basé sur des distorsions de maille des composés tungstates [98]. Le zirconate de baryum,  $\text{BaZrO}_2$ , partiellement cristallisé présente une luminescence bleu-vert sous excitation à 350 nm. Les chimistes, sur la base de caractérisations structurales comme la diffraction et l'absorption des rayons X, font l'hypothèse d'un mécanisme de luminescence basé sur des lacunes d'oxygène,  $\text{V}_\text{O}$ , dans les octaèdres  $[\text{ZrO}_6]$ , qui entraînent la formation de clusters déformés de  $[\text{ZrO}_5\text{V}_\text{O}]$ . Ces déformations induisent de nouveaux niveaux électroniques au sein de la bande interdite de la matrice qui induiraient les propriétés de photoluminescence [99]. Dans le cas, des matrices hôtes de titanates, telles que  $\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x\text{TiO}_3$ , élaborées par synthèses micro-onde, il a été fait état d'une large bande de photoluminescence allant de 400 nm à 800 nm sous irradiation à 350 nm. La luminescence est attribuée dans ce cas aux déformations des octaèdres  $\text{TiO}_6$  [100].

En outre, les matrices vanadates, telles que  $\text{Ca}_2\text{KMg}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ , ont une large bande d'émission de photoluminescence lorsqu'elles sont excitées dans le proche ultraviolet à 375 nm. Cette émission de photoluminescence a été attribuée à des transferts de charges des tétraèdres  $\text{VO}_4^{3-}$  qui dépend de leur degré de déformation mis en évidence par diffraction des rayons X [101]. En conclusion, ces matrices d'oxydes cristallisés, présentent de larges bandes d'émission dans le visible dont l'origine est généralement attribuée à des distorsions structurales, éventuellement associées à des lacunes d'oxygène. Néanmoins, l'émission de photoluminescence de ces composés est centrée dans le bleu-vert, ce qui engendre une émission de couleur froide. De plus, l'intensité de photoluminescence est assez faible et aucun rendement quantique n'est mentionné dans ces études.

De plus, les cristaux de  $\text{BPO}_4$  synthétisés par voie Pechini, présentent une large bande d'émission centrée dans le bleu à 409 nm sous excitation à 307 nm avec un rendement quantique de 17% et une durée de vie de 6,4 ns. Les chimistes attribuent la luminescence à des impuretés d'origines carbonées. Lorsqu'un faible pourcentage de bore est substitué par un ion alcalin ou alcalinoterreux,  $\text{Ba}^{2+}$  ou  $\text{Li}^+$ , les propriétés de luminescence des cristaux sont améliorées : l'intensité de la bande d'émission est augmentée avec son maximum décalé vers le rouge. Par exemple, le cristal  $\text{BPO}_4 : \text{Ba}^{2+}$  présente sous excitation à 325 nm une large bande d'émission dans le visible avec un maximum entre 416 et 415 nm, une durée de vie autour de 11 ns et un rendement quantique interne de 31%. La luminescence de ces cristaux est attribuée à la combinaison de résidus carbonés et à des radicaux peroxydes pour le dopage au  $\text{Ba}^{2+}$  ou à des lacunes d'oxygène pour le dopage par  $\text{Li}^+$  [102]. Des résultats similaires ont été obtenus pour des systèmes  $\text{BPO}_{4-x}\text{SiO}_2$  ( $x : 0-0.7$ ) et  $\text{BPO}_{4-y}\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x : 0-0.2$ ) élaborés par voie Pechini qui présentent de large bande d'émission sur le bleu et des durées de vie autour de 5 ns. L'origine de la photoluminescence est attribuée à des défauts carbonés et à des lacunes d'oxygène suite à des analyses de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et des calculs de théorie fonctionnelle de densité [103].

### 2.5.2.2 Les matériaux amorphes.

Les premiers matériaux amorphes sont les silicates. Dans ce domaine des travaux précurseurs ont été réalisés en 1997 sur la synthèse de verres de silicates possédant une large bande d'émission de photoluminescence dans le visible, c'est-à-dire de 450 à 600 nm sous excitation à 365 nm. L'élaboration a été effectuée à basse température par chimie sol-gel : réaction d'alcoxyde de silicium, de tetratethyl-orthosilicate ou de tetratmethylorthosilicate, dans un excès d'acide carboxylique (citrique, formique), suivi de recuits sous air entre 250 et 450°C. Ces poudres possèdent des rendements quantiques de photoluminescence de 20 à 45% sous excitation à 365 nm et pour des durées de vie inférieures à 10 ns. L'origine de la luminescence est attribuée à des défauts carbonés dans la matrice inorganique, détectés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, avec des bandes d'absorption entre 2700 et 3000  $\text{cm}^{-1}$  signifiant la présence de groupes aliphatiques et entre 700 et 1400  $\text{cm}^{-1}$  attribués à des résidus carbonyles. Lors du traitement thermique, les résidus organiques encore présents se décomposent partiellement induisant des défauts carbonés décrits Figure 43 [104].

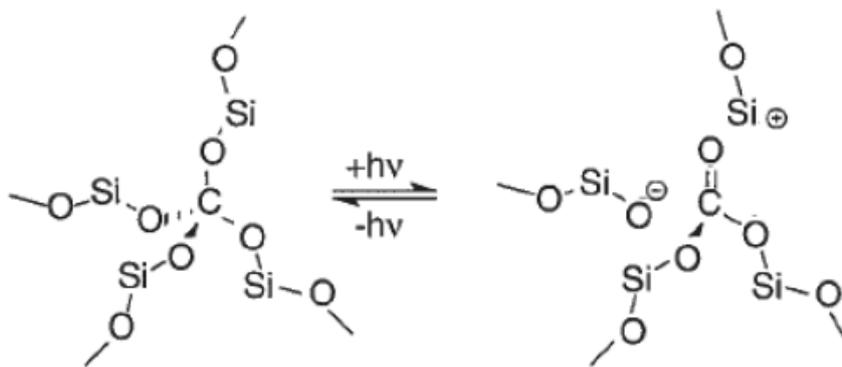


Figure 43 : Schéma des centres luminescents dans la silice vitreuse [104].

Ces premiers rendements de photoluminescence prometteurs, ont entraîné par la suite des recherches sur les matériaux luminescents à base de silicates : des verres, des gels, des sphères, des nanotubes, des aérogels de silice, ou en jouant sur la morphologie : des nanofils, des fibres, des nanoparticules de silice et encore des hybrides organiques-inorganiques à base de silicates [105]. Parmi ces matériaux qui présentent de larges bandes de photoluminescence dans le visible, différents mécanismes ont été proposés : des atomes d'oxygène non-pontants qui sont des centres à trous,  $h^+$ , décrits comme  $\text{SiOH}$  vers  $\text{SiO}\cdot + \cdot\text{H}$ , associés à des bandes d'émission de photoluminescence caractéristiques à 653 et 689 nm [106], et à des groupements peroxydes absorbants ou des centres appelés  $E'$  ( $\equiv\text{Si}\cdot$ ) caractérisés par une bande d'émission à 584 nm [107]. Par ailleurs, des poudres silicatées ont été synthétisées à partir de particules de polysiloxanes recuites sous hydrogène entre 800 et 1100°C pour éliminer les résidus carbonés, puis calcinées ensuite sous  $\text{O}_2$  entre 300 et 1200°C. Les chercheurs font état de l'existence de liaisons Si-O-C identifiées par analyses de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, avec une bande d'absorption Si-O-C à 1100  $\text{cm}^{-1}$ , qui seraient associées à une large bande d'émission de photoluminescence étendue sur tout le visible avec un maximum vers 530 nm, sous excitation à 370 nm.

En outre, ces poudres présentent des propriétés de phosphorescence qui sont détériorées pour les plus hautes températures de calcination. Enfin, des matrices de silice amorphe synthétisées par pyrolyse assistée micro-onde à partir d'un alcoxydes de silicium et d'acide citrique, présentent une large bande d'émission centrée à 440 nm. Les chimistes attribuent l'origine des propriétés de photoluminescence à des petits agrégats de cycles aromatiques graphitiques ou Carbon Dots, dispersés au sein de la matrice de silice [108].

Des verres d'aluminosilicate préparés par voie sol-gel et recuits sous air autour de 500°C présentent sous irradiation à 337,1 nm une large bande de photoluminescence située entre 400 et 650 nm, avec deux maxima à 420 et 520 nm. Ils présentent des rendements quantiques internes élevés (environ 66%) [109]. Pour l'émission à 420 nm, la luminescence est attribuée à des lacunes d'oxygène dans les verres, appelées centre F<sup>+</sup>. Ce type de défaut peut être détecté par absorption optique avec une forte bande à 5.0 eV (248 nm). Quant à l'émission à 520 nm, elle est attribuée à de radicaux carbonyles sur la base de de mesures de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier montrant les bandes de groupements C=O, 1500 et 1700 cm<sup>-1</sup> et de fonctions aliphatiques, 3000 cm<sup>-1</sup>, et de Résonance Paramagnétique Electronique présentant un signal hyperfin à g = 2,003.

La seconde technologie utilisée est l'alumine et les aluminates. L'alumine amorphe synthétisée par voie sol-gel ou par anodisation [110] présente sous excitation ultraviolet ou bleue, située entre 235 et 425 nm, de larges bandes d'émission allant de 350 à 600 nm avec un maximum compris entre 390 et 450 nm avec l'émission de photoluminescence qui disparaît dès l'apparition des premiers pics de cristallisation en cristallographie aux rayons X. Les écrits sur le sujet proposent un mécanisme de photoluminescence avec transfert d'énergie entre des lacunes d'oxygène de type VO<sup>0</sup>, VO<sup>+1</sup> et VO<sup>+2</sup>, excitées respectivement à 220 nm, 280 nm et à 310 nm et des résidus carbonés de type Al-O-C<sup>•</sup>=O permettant une émission à 420 nm. Les lacunes d'oxygène sont identifiées par la présence d'Al en coordinance 5 et par une raie hyperfine à résonance paramagnétique électronique avec un g=2,004 et par spectroscopie d'absorption des rayons X. D'autres travaux ont également été réalisés sur une alumine amorphe synthétisée par la méthode des précurseurs polymériques, avec des calcinations sous air entre 500 et 900°C. Les propriétés de photoluminescence sont similaires avec des durées de vie de 6-7 ns. La photoluminescence est dans ce cas imputée à des radicaux carbonyles identifiés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, avec une bande de vibration à 1435 et 1527 cm<sup>-1</sup>. Enfin, pour des films minces transparents d'alumine synthétisés par voie sol-gel, l'émission de photoluminescence essentiellement dans le bleu est attribuée à la présence de lacunes d'oxygène.

Ensuite les titanates composent la troisième famille des matériaux amorphes. Des films minces de PbTiO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub> et BaTiO<sub>3</sub> synthétisés par la voie des précurseurs polymériques et calcinés entre 300 et 500°C présentent une large bande d'émission entre 500 et 700 nm sous excitation à 448 nm, dans ce cas-là un laser argon. La photoluminescence est corrélée aux structures désordonnées car elle disparaît lors de la cristallisation des films. Ces structures désordonnées présentent deux environnements pour le titane, TiO<sub>5</sub> et TiO<sub>6</sub>, qui ont été déterminés par spectroscopie d'absorption rayons X au seuil du titane. Lorsque les films sont calcinés à des températures supérieures à 500°C, la diminution de l'intensité de photoluminescence est associée à la réduction des environnements [TiO<sub>5</sub>], qui entraîne une réduction du nombre d'atomes d'oxygène non-pontants.

Ainsi, d'après ces études la présence d'oxygène non-pontant dans les phases désordonnées serait responsable de l'émission de photoluminescence intense [111].

Enfin la dernière famille, celle utilisée dans la suite de ce manuscrit se compose des oxydes métalliques : Des poudres de zircon amorphes ont été synthétisées par la voie des précurseurs polymériques ou chimie sol-gel et calcinées sous O<sub>2</sub> vers 500°C. Elles présentent une bande d'émission de photoluminescence étendue entre 400 et 600 nm avec un maximum d'émission à 425 nm sous excitation dans le proche ultraviolet et dans le bleu. Ces études proposent une luminescence basée sur des résidus carbonés dispersés dans la matrice. Des analyses de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier confirment la présence de groupements carboxylates -COO<sup>-</sup>, avec des bandes d'absorption à 1457 et 1556 cm<sup>-1</sup> et de liaisons C-O, C-H et C-C, avec des bandes d'absorption à 1409, 1342 et 1276 cm<sup>-1</sup>. D'autre part, un signal à résonance paramagnétique électronique avec un  $g = 2,0045$  a été caractérisé et attribué à un radical carbone qui serait à l'origine de l'émission centrée vers 425 nm. De plus, des échantillons de zircon amorphes, préparés par voie solide directement à partir du précurseur ZrCl<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O recuit à 500°C, sans contamination de carbone, ne présentent aucune émission de photoluminescence. C'est pourquoi, les chimistes estiment que les centres émetteurs sont des résidus carbonés piégés au cours du traitement thermique au sein de la matrice minérale hôte [112].

Des oxydes d'yttrium amorphes ( $\alpha$ -Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) synthétisés par voie sol-gel et calcinés à 550°C, présentent une émission intense blanche bleutée entre 350 et 600 nm avec un maximum d'émission à 420 nm, lorsqu'elles sont excitées dans le proche ultraviolet. De plus, ils présentent de hauts rendements quantiques internes autour de 65 %, mesurés grâce à une sphère d'intégration.

Ainsi, sur la base bibliographique réalisée sur les oxydes luminescents amorphes basés sur des défauts structuraux comme le montre le tableau 5 suivant, les bandes de photoluminescence sont étendues dans le domaine visible, mais leur maximum d'émission est centré essentiellement dans le bleu et le vert. En outre, peu de rendements quantiques sont présentés, il est donc délicat de faire une appréciation des propriétés de photoluminescence de chaque type de matériau.

Exemple représentatif		Méthode de synthèse	Excitation	Emission	Rdt PL (QY)	Mécanisme possible
Silicate carboxylate	poudre	Sol-gel	365 nm	400-800 nm $\lambda_{\max} = 450-600$ nm	0,20-0,45	Défauts carbonés substitués
SiO <sub>2</sub>	verre	Sol-gel	337,1 nm	350-650 nm $\lambda_{\max} = 420-$ et 520 nm		Déficience d'oxygène (420 nm), et radicaux carbonyles (520 nm)
		Déposition axiale phase vapeur	Absorption à 3,8 eV	1,9 eV = 652 nm		NBOHC (1,9 eV) et liaison peroxyde (3,8 eV)
SiO <sub>2</sub>	poudre	Pyrolyse micro-onde	290 nm, 360 nm	350-575nm $\lambda_{\max} = 360$ nm (exc 290 nm) 440 nm (exc 360 nm)		CDs
Silicate	poudre	Sol-gel	370 nm	400-700 nm $\lambda_{\max} = 530$ nm		Résidus carbonés (liaison Si-O-C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	verre	Sol-gel	337,1 nm	350-650 nm $\lambda_{\max} = 420-$ 520 nm		Lacunes d'oxygène et radicaux carbonylés
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	poudre	Sol-gel	235-425	350-600 nm $\lambda_{\max} = 390-$ 450 nm		Résidus carbonés
	poudre	Voie liquide	Bandes d'excitation à 220 nm, 280 nm et à 310 nm	350-650 nm $\lambda_{\max} = 390-$ 450 nm		Lacunes d'oxygène (V <sub>o</sub> <sup>0</sup> , V <sub>o</sub> <sup>+1</sup> et V <sub>o</sub> <sup>+2</sup> ) et les résidus carbonés
	Film minces	Voie liquide	365 nm	380-650 nm $\lambda_{\max} = 420$ nm		Lacunes d'oxygène et peroxyde
BaTiO <sub>3</sub>	Film mince	Précurseurs polymériques	448 nm	500 - 700 nm		Oxygènes non-pontants
ZrO <sub>2</sub>	poudre	Hydrolyse contrôlée suivie par un traitement thermique	365 nm	400-600 nm $\lambda_{\max} = 425$ nm		Impuretés carbonées
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	poudre	Sol-gel	Proche UV	350-600 nm $\lambda_{\max} = 420$ nm	0,65	Résidus carbonés

**Tableau 5 : Exemples de composés amorphes luminescents [112].**



## 2.6 Conclusion.

Les sources laser doivent répondre à plusieurs problématiques bien distinctes, dans ce but il est nécessaire de connaître au mieux chaque composant la constituant, surtout si comme dans ce cas-là ces composants ne sont pas produit initialement pour être utilisés les uns avec les autres.

Le prochain chapitre de ce manuscrit analysera tout d'abord les besoins et les problématiques liés aux sources lumineuses ainsi que les moyens de les caractériser. Ensuite la modélisation du couplage source laser / luminophore sera étudié dans le but de créer un modèle acceptable sur LightTools dans lequel il sera possible de modifier les caractéristiques interne du luminophore afin de l'adapté au maximum à la source laser et de corriger certain défauts liés au laser comme la forte part de lumière bleue en sortie. Ensuite plusieurs méthodes de caractérisation seront essayées sur LightTools afin de comparer les résultats attendus et obtenus. Ces résultats pourront ensuite être comparés à ce qui se trouve actuellement dans le domaine de l'éclairage dans le but d'avoir un standard à respecter et voir les meilleures conditions à garder pour les tests physiques permettant de valider la modélisation.

Enfin le dernier chapitre se concentrera sur la partie expérimentale. Tout d'abord le banc de test expérimental sera analysé point par point ce dernier étant composé de : la source lumineuse, son alimentation et les divers appareils de mesure. Puis le cahier des charges suivi sera défini et les différents procédé expérimentaux seront par la suite indiqués et étudiés avant de finir par une synthèse des résultats et une conclusion basée sur ces derniers. Enfin une conclusion générale viendra ponctuer ce manuscrit.



# Chapitre 3 : caractérisation, modélisation et problématiques du couplage diode laser / luminophore.

## 3.1 Introduction.

Le chapitre précédent a permis de connaître le fonctionnement d'une diode laser ainsi que la composition des luminophores actuellement utilisés. Dans ce chapitre, la première partie se concentrera sur la quantification de l'impact d'un certain nombre de paramètres comme la température de la diode laser ou du luminophore, le niveau de courant de la diode et son niveau de tension. Ce chapitre s'articulera sur les problématiques des diodes laser ainsi que de celles liées au couplage de ces diodes avec un luminophore. En effet actuellement les luminophores trouvables dans le commerce sont adaptés à des LEDs celles-ci étant moins directive et produisant moins de puissance lumineuse sur une même surface donnée il faudra adapter les luminophores existant dans le but d'optimiser la source lumineuse résultante. Dans un premier temps le but sera de réaliser un modèle optique permettant d'analyser les conséquences de la forme de la raie laser sur le luminophore puis dans un second temps plusieurs modifications théoriques du luminophore seront proposées dans le but de pallier aux problèmes principaux liés aux sources laser. Cette modélisation sera réalisée sur le logiciel Lighttools et utilisera une approche par la diffusion de Mie pour modéliser le luminophore afin de s'affranchir dans un premier temps des problématiques de conception chimique de celui-ci. Ensuite une fois les principaux problèmes identifiés clairement, trois modifications différentes des caractéristiques intrinsèques du luminophore seront étudiées afin de voir leurs possibles impacts ainsi que leur correspondance avec la réalité expérimentale. Vers la fin de ce chapitre, une fois la meilleure solution choisie celle-ci sera modélisée et caractérisée par une approche complémentaire à la diffusion de Mie : l'étude de l'efficacité quantique du luminophore. Enfin le chapitre suivant se concentrera sur l'étude expérimentale de la source lumineuse ainsi que l'analyse de différents luminophores obtenus. Cette étude se portera sur les caractéristiques recherchées généralement sur les sources blanches comme la température de couleur, le CRI et les coordonnées chromatiques ainsi que sur l'efficacité quantique expérimentale d'un luminophore créé pour l'occasion.



## 3.2 Caractéristiques de la source lumineuse étudiée.

Afin de pouvoir créer le modèle adéquat il est nécessaire de définir la source voulu avec les caractéristiques recherchées pour celle-ci. Cette étude se base principalement sur ce qui existe actuellement en matière de création de lumière blanche par l'association d'une LED avec un luminophore et s'adapte ensuite aux problèmes, spécifiques à l'utilisation du laser, qui apparaissent par la suite. En effet une diode laser comporte une cavité lumineuse bien inférieure à celle d'une LED ce qui permet d'obtenir une raie lumineuse de largeur de bande spectrale bien inférieure : entre 0.1 et 5 nm là ou une LED a une largeur de bande de 25 à 100 nm. La lumière obtenue avec une diode laser peut ainsi être considérée comme monochromatique. De plus cette lumière est cohérente c'est-à-dire que l'énergie, la phase et la fréquence sont les même pour tous les photons émis. Cette cohérence fait que la raie lumineuse obtenue est fortement directive. Actuellement deux méthodes principales sont utilisées pour créer de la lumière blanche grâce aux luminophores. La première, utilisée dans ce manuscrit est l'utilisation d'une diode laser bleue couplée à un luminophore jaune, le tout permettant d'obtenir de la lumière blanche. La seconde méthode, plus complexe, nécessite une diode laser située proche des ultra-violets et un assemblage de deux luminophores : un transposant la raie lumineuse vers le bleu et le second étant similaire au luminophore jaune précédant permettant d'obtenir du blanc. Cette dernière méthode, bien que plus difficile à mettre en place, permet de réduire l'impact de la lumière bleue en sortie de la source lumineuse : l'un des buts des travaux de recherche suivants est d'obtenir un résultat similaire en modifiant le luminophore plutôt que la raie d'émission du laser. La source lumineuse résultante de ces travaux doit correspondre à certains critères :

Les spécifications toutes particulières de ce sujet, l'éclairage en intérieur dans un laboratoire, font que le moindre détail à son importance. L'éclairage doit être précis et contrôlé pour éviter au maximum les gênes et les erreurs. Dans le cas présent, la différenciation des éléments s'effectue sur leur luminosité et sur leur couleur. Les contrastes étant très faibles, cela demande un haut niveau de luminance d'environnement, une bonne uniformité sur tout le champ, ainsi qu'un très bon rendu des couleurs. L'uniformité de l'éclairage sur tout le champ pouvant être parcourus du regard par l'opérateur évitera les troubles visuels dû à des différences de luminance trop marquées. La présence simultanée de composante rasante et perpendiculaire sera nécessaire pour une meilleure distinction des reliefs de l'objet observé. Dans l'application envisagée, un IRC supérieur à 90 est requis afin de permettre une bonne reconnaissance des couleurs. La température de couleur demandée correspond aux circonstances dans lesquelles les opérateurs ont appris à reconnaître les éléments. La valeur devra se situer autour de 5000 K, celle valeur correspondant à la température de couleur de la lumière du jour par temps clair. La figure 44 ci-dessous montre le changement de couleur d'un environnement en fonction de la température de couleur de la source utilisée pour l'éclairer.



Figure 44 : changement de perception d'un environnement en fonction de la température de couleur de la source lumineuse [113].

Un autre paramètre, souvent lié à la température de couleur, revêt une importance primordiale dans le cadre d'une source de lumière blanche en intérieur : l'indice de rendu des couleurs ou IRC. Celui-ci caractérise la capacité d'une source à restituer sans déformation les différentes couleurs de l'objet qu'elle éclaire comme le montre la figure 45 suivante [114]. L'indice maximum de 100 correspond au spectre d'un corps noir, correspondant à la lumière naturelle. Dans ce cas l'observateur peut parfaitement distinguer les nuances de couleurs étant, par nature, habitué à ce type de source lumineuse. Les lampes à incandescence sont basées sur ce principe de rayonnement et ont un IRC de 100. Les autres lampes d'intérieur garantissent en général un IRC supérieur à 80. Le but de ces travaux est d'obtenir un IRC supérieur à 90 sachant que le spectre lumineux de la source étudié est très différent de celui d'un corps noir.

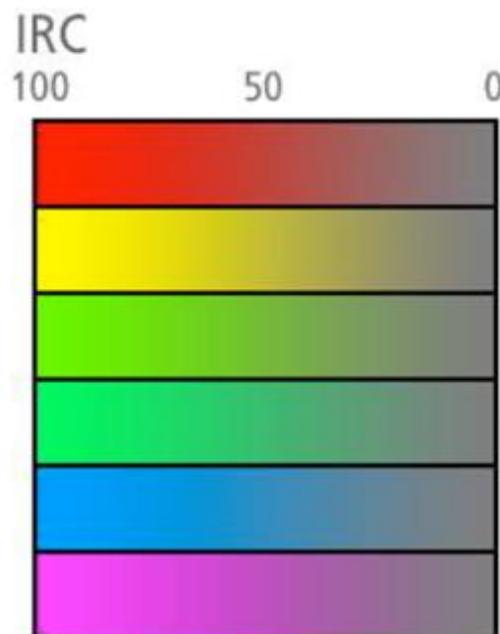


Figure 45 : illustration de la notion d'indice de rendu des couleurs.

### 3.3 Modèle de référence et première approche par le contrôle de la lumière bleue.

La modélisation du couplage diode laser/luminophore sera réalisée grâce au logiciel LightTools celui-ci permettant d'avoir un excellent contrôle sur les paramètres étudiés. Cette modélisation s'axera sur deux composants principaux :

Tout d'abord une diode laser bleue Osram PL TB450 de longueur d'onde 450 nm, celle-ci à une puissance optique maximale de 1,7W pour une tension d'entrée de 5V et un courant maximum de 1.2 A. Cette diode sera ici représentée par un modèle fourni par le constructeur sur LightTools, elle sera non focalisée afin de n'apporter aucune autre influence que celle du luminophore. Le courant sera fixé de façon à avoir 1W de puissance optique de sortie.

Ensuite un luminophore constitué d'un pourcentage de YAG (Yttrium Aluminium Grenat) mélangé dans du silicium selon une concentration pouvant varier selon les résultats voulus. Durant la modélisation la forme du luminophore pourra elle aussi varier mais restera dans les limites suivantes : celui-ci sera circulaire, de diamètre maximum 3 cm et d'épaisseur variable mais au maximum de 1.8 cm. Enfin un récepteur planaire sera placé après le luminophore à 7 cm de la diode laser. La figure suivante montre le modèle obtenu selon les paramètres de base de cette modélisation le luminophore fait donc 1 cm de diamètre pour une épaisseur fixe de 1.8 cm. Ce luminophore de référence est constitué de 10% de YAG mélangé dans du silicium. Afin de représenter la composition de ce luminophore sur LightTools il sera remplacé par son équivalence approchée par la diffusion de Mie, les bases de cette théorie seront exposées plus bas.

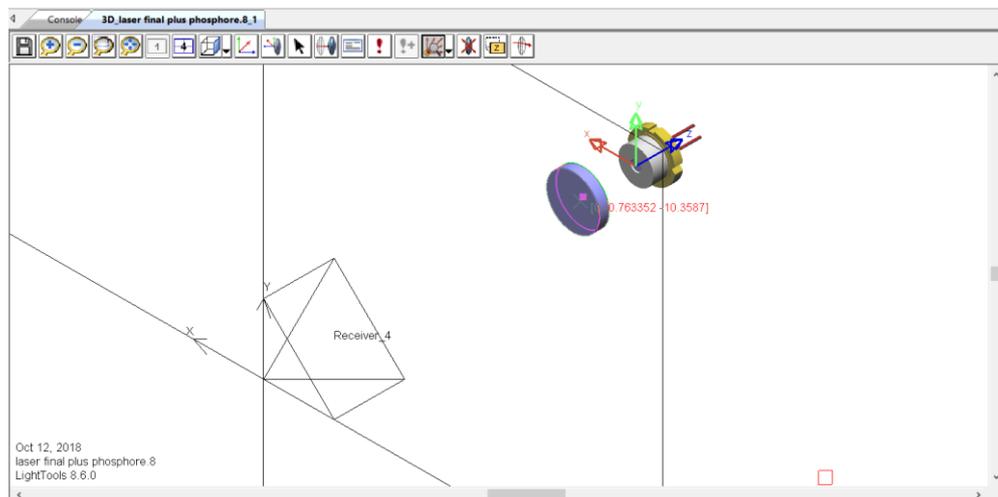


Figure 46 : modèle de base de la source sur LightTools.

Ce modèle sert de base pour la suite des travaux il permettra aussi de définir l'éclairement de référence qui permettra de noter les améliorations apportées. La figure suivante montre l'éclairement, en  $W/mm^2$  obtenu sur le récepteur ainsi que la couleur de la source au niveau de ce même récepteur.

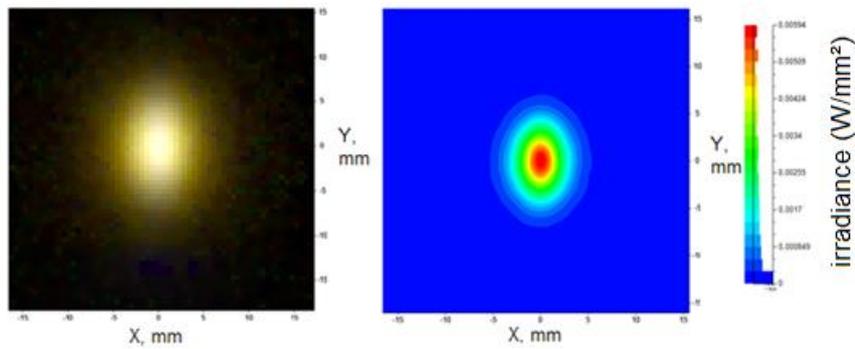


Figure 47 : couleur et éclairement obtenus dans le cas du luminophore de référence.

Le spectre obtenu, montré sur la figure ci-dessous présente un défaut inhérent aux LEDs mais accentué ici : du fait de la composition de la source lumineuse une forte raie bleue très directive se retrouve directement en sortie du luminophore, cette lumière bleue, si elle n'est pas directement identifiable, peut quand même s'avérer à la longue néfaste pour l'œil de l'utilisateur [115]. Afin de réduire au maximum l'impact de cette lumière bleue ces travaux chercheront à modifier le luminophore de manière non uniforme dans le but de contrôler le flux de lumière bleue là où elle est prépondérante, au centre de celui-ci, et de compenser cela par un contrôle plus faible sur les bords du luminophore afin que la lumière totale résultante reste dans des valeurs satisfaisantes.

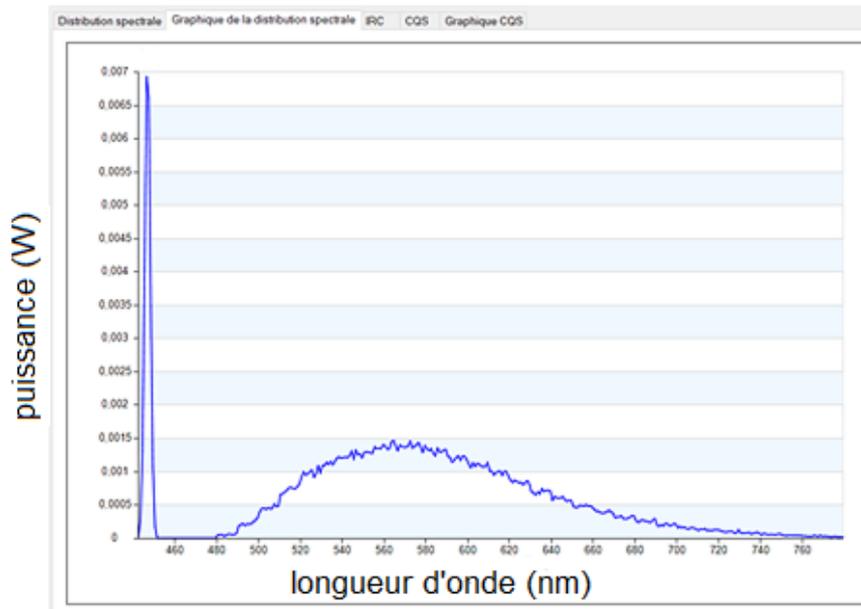


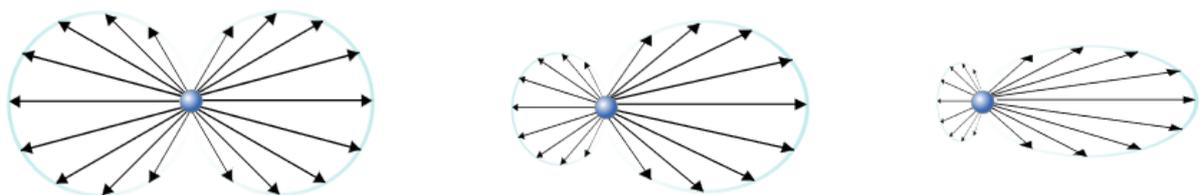
Figure 48 : spectre obtenu pour le luminophore de référence.

## 3.4 Diffusion de Mie et base des modifications du luminophore.

Afin de représenter le luminophore sans avoir à connaître sa composition exacte celui-ci peut être représenté par son approche par la diffusion de Mie. Avant d'entrer dans les détails du processus suivant il convient de définir les bases de cette théorie ainsi que les grandeurs qui seront exploitées sur LightTools.

Celle-ci tire ses origines de la diffusion de Rayleigh qui servit à John William Strutt Rayleigh en 1871 dans le but d'expliquer la couleur du ciel en se basant sur la diffusion de la lumière par les molécules contenues dans l'air. Cette théorie se vérifie dans le cas de molécules dont la taille est au moins dix fois inférieure devant la longueur d'onde de la radiation si bien que les variations spatiales du champ électromagnétique peuvent être négligées à l'échelle du nuage électronique. L'atome est alors soumis à la force magnétique et la force électrique. La première est négligeable devant la seconde. D'autre part, le noyau étant beaucoup plus lourd que l'électron, son déplacement est négligé devant celui de l'électron [116]. Celle-ci, variant d'un facteur  $\lambda^{-4}$ , fait que lors de cette diffusion la lumière bleue est bien plus impactée que le reste du spectre lumineux donnant au ciel son aspect bleu en journée et au soleil son aspect rouge au couchant.

La théorie de Lorenz-Mie ou diffusion de Mie, plus généralement appelée diffusion de Mie, tire son nom des physiciens Ludvig Lorenz et Gustav Mie. C'est ce dernier qui lui donna sa première forme en 1908 en se basant sur les travaux de Rayleigh et en les adaptant aux particules dont la taille se situe au même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la radiation étudiée. Cette théorie est complexe et des résultats quantitatifs ne sont obtenus qu'avec des particules de géométries symétriques. Dans le cadre de LightTools les particules sont considérées comme sphériques. Dans le cadre de cette théorie la puissance diffusée est maximale lorsque la particule est grande devant la longueur d'onde. Les propriétés de diffusion des particules dépendent de leur taille, de leur forme et de leurs constantes intrinsèques. Selon Mie, la quantité d'énergie diffusée vers l'avant est plus importante que dans n'importe quelle autre direction. Lorsque la taille de la particule augmente, la diffusion vers l'avant augmente également. La diffusion type des particules plus importantes de la lumière incidente est illustrée par la figure ci-dessous.



**Figure 49 : De gauche à droite : intensité de la diffusion Rayleigh, de la diffusion Mie pour de petites particules et de la diffusion Mie pour de grosses particules, en fonction de la direction. L'onde incidente arrivant par la gauche [117].**

Cette théorie va donc permettre de simuler l'effet d'absorption et d'émission du luminophore en n'utilisant que deux paramètres : tout d'abord la densité de particule au sein du luminophore, c'est ce paramètre qui affecte directement les paramètres d'absorption et d'émission du luminophore. Cela influence également le taux de conversion de la lumière bleue. Ensuite la taille des particules composant le luminophore rend explicite l'effet du changement de la composition du luminophore sans avoir à la connaître. C'est cette dernière qui va influencer principalement le diagramme de diffusion du luminophore et donc de la source. Enfin un troisième paramètre, extérieur à la diffusion de Mie sera lui aussi contrôlé : l'épaisseur du luminophore. Une épaisseur importante sera conservée au centre du luminophore, celui-ci s'affinera progressivement sur les bords tout en gardant un écart réaliste entre l'épaisseur maximale et minimale. Ceci permettra d'atténuer la lumière bleue dans la zone où elle est concentrée sans perturber l'homogénéité de l'ensemble.

## 3.5 Etude de la réduction de la lumière bleue.

Comme expliqué au-dessus trois paramètres du modèle du luminophore ont été étudiés. Dans chacun des cas, un gradient de propriétés est introduit afin de modifier la répartition spatiale du faisceau produit ces propriétés ont été définies par itérations successives. Pour chacun la puissance optique à la sortie du luminophore sera étudiée et comparée à celle du luminophore de base montré au-dessus. Afin de pouvoir modifier les caractéristiques du luminophore de façon non uniforme, celui-ci sera modélisé différemment lors de l'étude de l'impact des caractéristiques de Mie. Pour cela le luminophore de 11 mm de rayon pour 1 mm d'épaisseur sera constitué de 11 couches concentriques de 1 mm d'épaisseur radiale tel que visible dans la figure ci-dessous. Cette « cible » est principalement constituée de silicium et ses caractéristiques intrinsèques seront représentées ici par la diffusion de MIE relative aux interactions des indices d'absorption et de réflexion du matériau. Un filtre est appliqué de façon à conserver uniquement les longueurs d'ondes inférieures à 480nm. La densité de puissance optique est évaluée dans un plan perpendiculaire au centre du faisceau et placé à 3 cm du luminophore. Les résultats présentés sont obtenus par itérations successives. Le but étant de maximiser l'aire délimitée par la courbe de niveau correspondant à 80% de la puissance maximale au centre du faisceau.

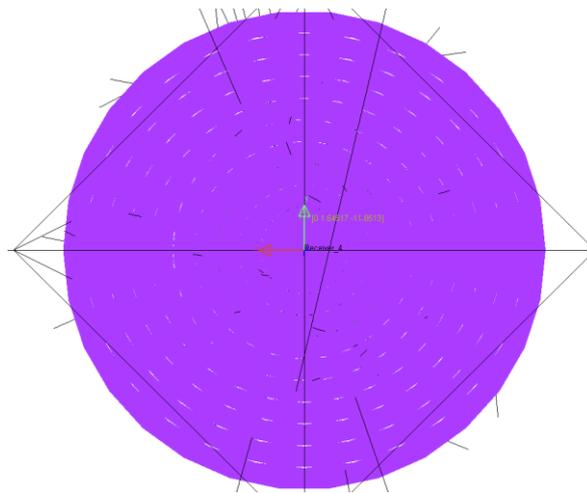


Figure 50 : luminophore « cible » modélisé sur LightTools.

### 3.5.1 Impact de l'épaisseur du luminophore.

Le premier critère étudié sera donc l'impact de l'épaisseur du luminophore, celui-ci a été optimisé de façon à avoir la lumière bleue diffusée sur la plus large portion du luminophore possible. Le résultat obtenu sera comparé au luminophore de référence pour l'éclairage. De plus la part de bleu en sortie sera elle aussi comparée à celle obtenue pour la référence. La figure suivante montre le profil retenu pour la forme optimale du luminophore, ce profil tiens compte des contraintes de réalisation du luminophore celui-ci étant réalisé par moulage et devant garder une certaine épaisseur minimum afin de ne pas être dégradé par le laser.

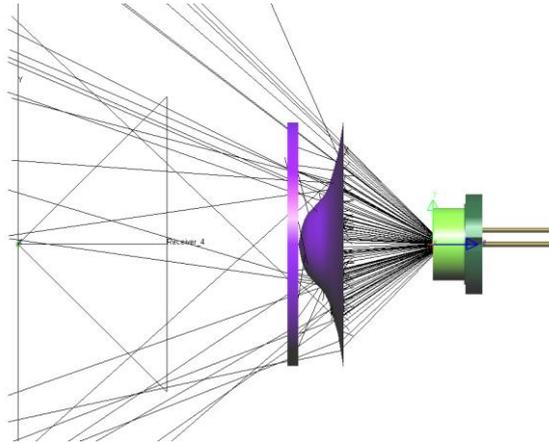


Figure 51 : profil du luminophore dit « cône » dont seule l'épaisseur varie.

Ce modèle servant uniquement à caractériser l'impact de l'épaisseur du luminophore, la taille des particules et leur densité sont fixées aux valeurs de référence. La taille de particule de référence est de 7 nm et la densité de ces particules est de  $2 \times 10^{13} \text{ mm}^3$ . La figure suivante montre l'éclairement obtenu comparé à l'éclairement de référence.

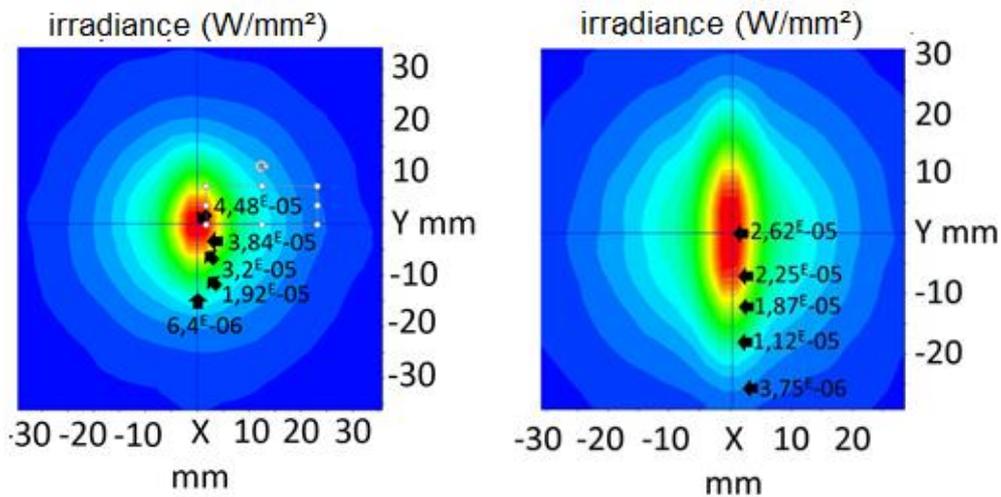


Figure 52 : Comparaison de la puissance optique de référence (à gauche) avec celle du luminophore « cône » (à droite) [ $\text{W}/\text{mm}^2$ ].

Comme le montre les figures précédentes, dans le cas du luminophore « cône », une meilleure harmonisation de la lumière bleue peut être observée. Par contre celle-ci est plus marquée verticalement. Cela peut venir du fait que la diode laser n'est pas encapsulée, donc non focalisée, l'impact de l'effet laser marque donc cette différence. Une fois la forme optimisée, un filtre coupant les longueurs d'ondes supérieures à 480 nm est rajouté afin de ne récupérer que la part de bleue en sortie. La figure ci-dessous montre cette part de bleue comparée à la puissance optique totale selon l'axe vertical afin d'avoir un résultat précis.

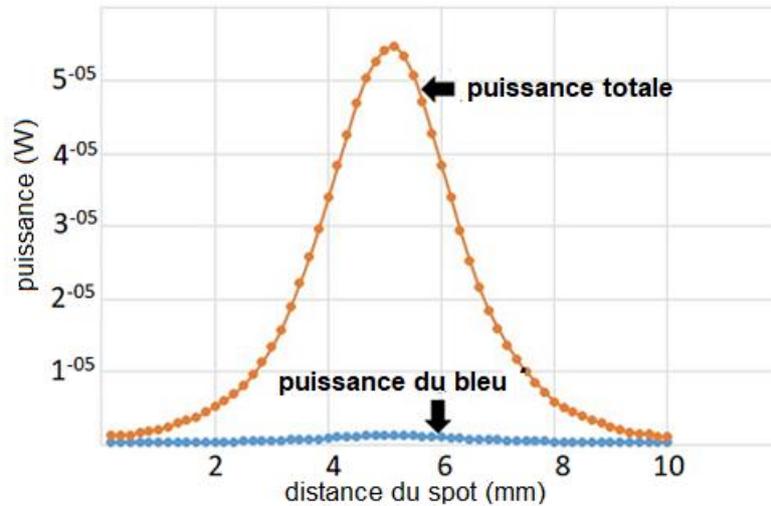


Figure 53 : densité de puissance totale et de la lumière bleue pour le luminophore « cône ».

Le résultat obtenu présente une part de bleu bien trop faible pour pouvoir monter à des températures de couleur trop élevés. Les limitations de ce modèle sont d'une part dues au moule utilisé pour la création du luminophore et d'autre part à l'épaisseur minimale du luminophore au-dessous de laquelle le laser pourrait dégrader ce dernier. La conception du luminophore demande un moule conforme à la forme simulée et il faudra l'ajuster en tenant compte de la puissance du laser. Cette solution est assez difficile à essayer en laboratoire dû aux contraintes de la création du moule sachant que celui-ci doit supporter le passage au four lors de la fabrication du luminophore.

### 3.5.2 Impact de la taille des particules du luminophore.

Le second critère contrôlé est la taille des particules utilisées dans le calcul de la diffusion de Mie. Ce critère permet de modifier la diffusion du luminophore et de modéliser plus spécifiquement l'ajout dans celui-ci d'autres composants que le YAG utilisé généralement. La figure suivante montre les valeurs de taille de particules retenues pour chaque couche du luminophore « cible » la valeur de la couche, notée de 1 à 11, augmente en s'éloignant du centre du luminophore.

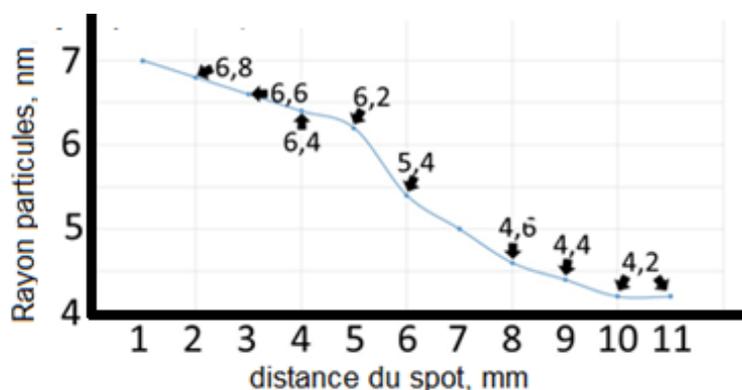


Figure 54 : rayon des particules du luminophore R en nm, pour chaque couche de la « cible » Y.

Ce modèle ne dépendant que de la taille des particules les deux autres paramètres sont fixés à leur valeur de référence. Ainsi l'épaisseur du luminophore est fixée à 1.8 mm et la densité de particule dans chaque couche de la cible est de  $2.3 \times 10^{13}/\text{mm}^3$ . Encore une fois la figure suivante montre l'éclairement obtenu comparé à l'éclairement de référence.

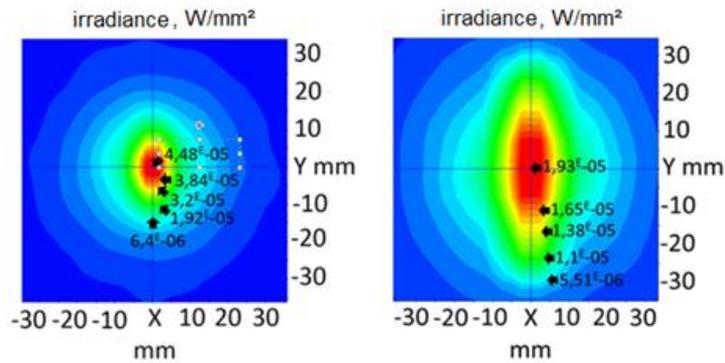


Figure 55 : Comparaison de la puissance optique de référence (à gauche) avec celle du dispositif à gradient de taille des particules (à droite) [ $\text{W}/\text{mm}^2$ ].

Dans le cas vu ci-dessus le contrôle de la diffusion de la lumière bleue est plus efficace et plus poussé que dans le précédent. En effet en séparant le luminophore en plusieurs concentriques il devient plus simple d'adapter précisément chaque couche de celui-ci. Par contre dans le cas d'une réalisation expérimentale les valeurs de taille de particule correspondant à la composition chimique du luminophore. Ainsi la composition réelle ne pourra pas changer aussi brutalement que dans le modèle mais cette méthode reste plus facilement réalisable et adaptable que la précédente même si cela reste limité par le faible nombre de matériaux adaptés aux diodes laser. Comme pour le premier cas, la figure si dessous montre la part de bleu résultante comparée à la puissance optique totale selon l'axe vertical.

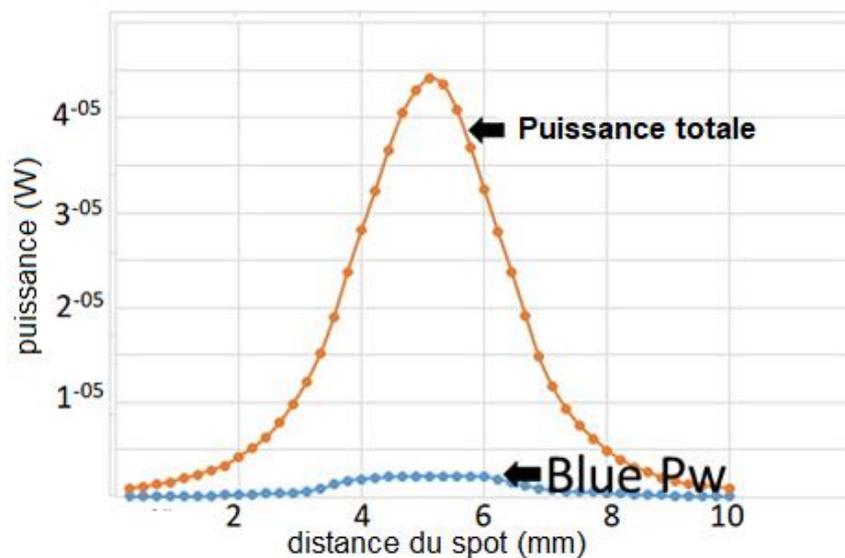


Figure 56 : densité de puissance totale et de la lumière bleue pour le dispositif à gradient de taille des particules.

Le résultat obtenu présente une part de bleu moins faible que précédemment mais reste malgré tout trop faible pour les sources de plus de 5000 K de température de couleur. Dans le but d'une réalisation expérimentale il pourrait être intéressant de procéder à des études permettant d'analyser et de lier la composition chimique d'un luminophore avec ce paramètre car le moule du luminophore résultant est bien plus facile à réaliser que le précédent. Enfin une autre solution est de placer deux luminophore différents consécutivement pour réduire l'impact de la lumière bleue mais ceux existant actuellement ont une efficacité quantique trop faible pour avoir un résultat satisfaisant.

### 3.5.3 Impact de la densité de particules du luminophore.

Le dernier critère étudié ici est la densité des particules utilisée elle aussi dans le calcul de la diffusion de Mie. Ce critère affecte tout particulièrement les paramètres d'absorption et d'émission du luminophore, il permet de modéliser les variations de concentration du luminophore au sein du liant, dans ce cas-ci le silicium. La figure suivante montre une fois de plus les valeurs de densité de particules retenues pour chaque couche du luminophore « cible » la valeur de la couche, augmente une fois de plus en s'éloignant du centre du luminophore.

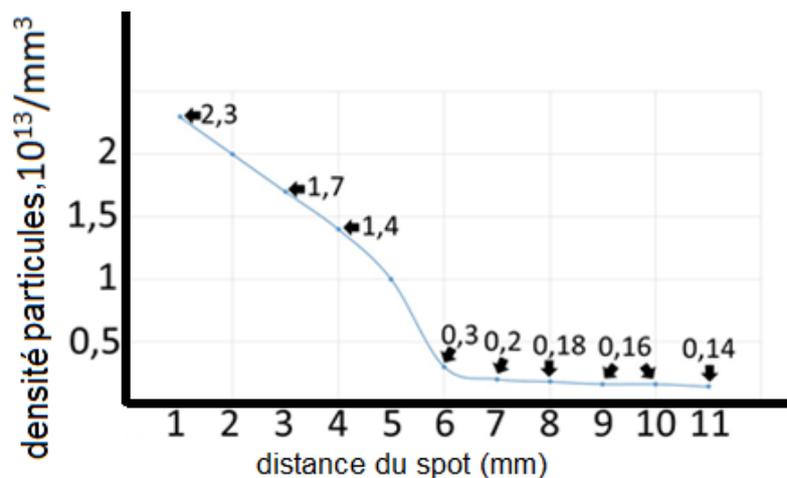


Figure 57 : densité de particule du luminophore D pour chaque couche Y de la « cible ».

Ce modèle ne dépendant que de la densité des particules les deux autres paramètres sont fixés à leur valeur de référence. Ainsi l'épaisseur du luminophore est fixée encore une fois à 1.8 mm et la taille des particules dans chaque couche de la cible est de 7 nm. Encore une fois la figure suivante montre l'éclairement obtenu comparé à l'éclairement de référence.

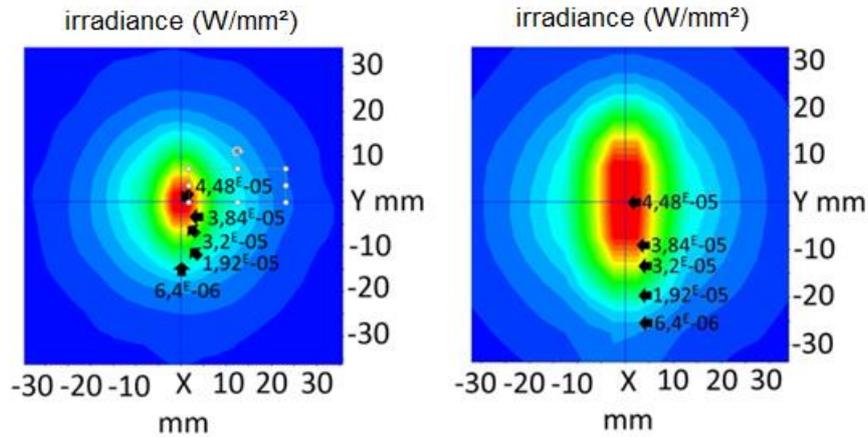


Figure 58 : Comparaison de la puissance optique de référence (à gauche) avec celle du dispositif à gradient de densité des particules (à droite) [W/mm<sup>2</sup>].

Ce dernier cas s'avère être le plus prometteur pour la suite, en effet la densité de particule représentant la concentration du luminophore il est facile de parfaitement contrôler cette dernière. Il serait même possible de réaliser un luminophore similaire à celui modélisé dans LightTools grâce au moule adéquat ou en vaporisant ce dernier sur une surface transparente, permettant ainsi de contrôler la concentration grâce à la vaporisation du luminophore. En plus de la relative facilité de réalisation expérimentale cette méthode présente les meilleurs résultats tout en gardant des valeurs de température de couleur correspondantes aux valeurs recherchées. Comme pour les cas précédents, la figure ci-dessous montre la part de bleue résultante comparée à la puissance optique totale selon l'axe vertical.

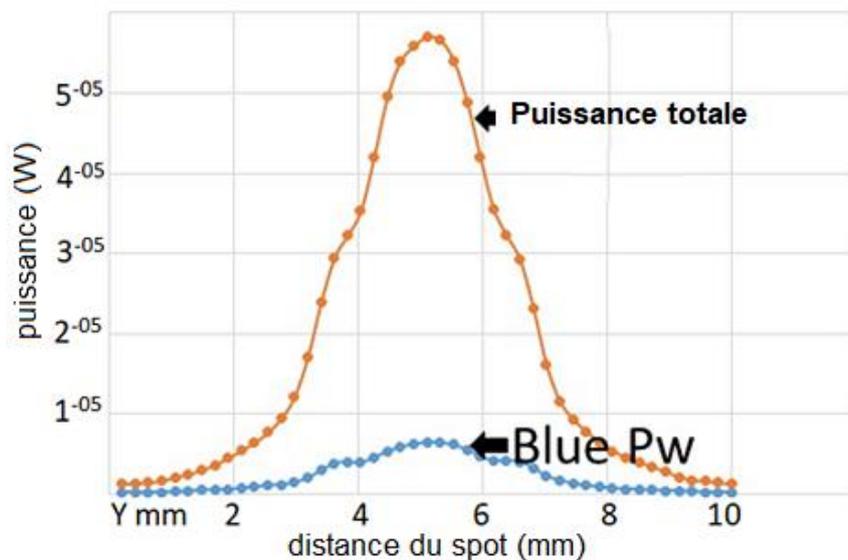


Figure 59 : densité de puissance totale et de la lumière bleue pour le dispositif à gradient de densité de particule.

Le résultat obtenu présente une part de lumière suffisante pour obtenir une lumière blanche suffisante. De plus le pourcentage de bleu dans la puissance optique globale ne varie pas énormément verticalement donc les limites de concentration du luminophore ne sont pas encore atteintes. Ensuite pour la réalisation expérimentale il est plus facile d'avoir de nombreux échantillons différents vu que la composition chimique du luminophore est d'abord définie clairement avant la création de luminophores ayant les concentrations voulues. Enfin cette méthode peut s'adapter des luminophores actuels en prenant les technologies déjà optimisées pour l'éclairage LED et en changeant la concentration afin d'obtenir des résultats convenables avec la diode laser utilisée.

### 3.5.4 Conclusion sur l'atténuation de la lumière bleue par modification du luminophore.

Cette étude a permis de montrer la faisabilité de la modification du luminophore dans le but d'obtenir une réduction de l'impact de la lumière bleue. La suite s'axera donc sur deux analyses distinctes :

Tout d'abord dans le cas le plus réalisable, celui du contrôle de la densité du luminophore la modélisation sera approfondie afin de prendre en compte une méthode de mesure de l'efficacité quantique de celui-ci dans le cadre d'un procédé éprouvé et utilisé actuellement pour la plupart des sources lumineuses actuelles. Ce procédé permet de connaître précisément l'efficacité quantique du luminophore et donc de savoir la part de lumière bleue absorbée et la part obtenue en sortie de la source lumineuse. Ce nouveau modèle prendra en compte les éléments finaux existants sur la table de test utilisée au chapitre suivant comme la sphère intégrante utilisée pour la mesure. Cette modélisation sera ensuite validée expérimentalement au sein du laboratoire afin de vérifier les valeurs utilisées pour la modélisation.

La seconde partie portera sur la création de luminophores adaptés aux conditions modélisées dans les deux cas les plus probants, à savoir la modification de la composition du luminophore et la modification de la concentration de celui-ci dans le silicium. Pour cette étude un certain nombre de luminophores commerciaux ont été achetés et un autre nombre a été créé directement au sein du laboratoire au cours de ces travaux. Une fois la composition satisfaisante choisie la concentration de celle-ci a été modifiée afin de voir l'impact sur l'efficacité quantique du luminophore.

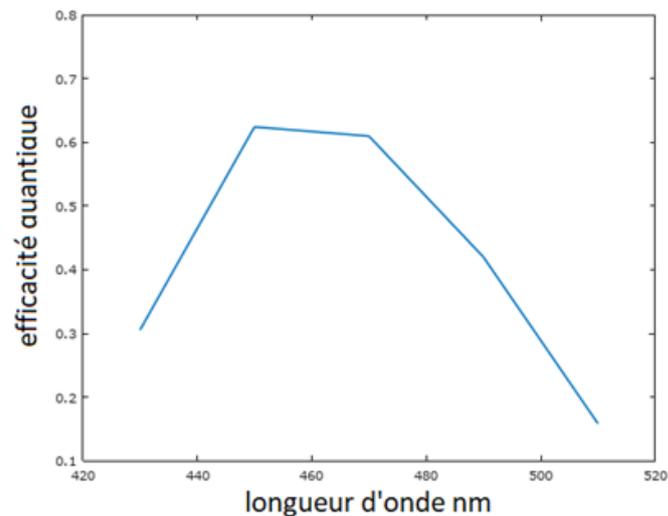
La fin de ce chapitre va elle détailler le concept d'efficacité quantique ainsi que la méthodologie mise en place pour la mesurer et finira sur la modélisation du banc de test final avant de passer à l'approche expérimentale au chapitre suivant.



## 3.6 Validation de l'impact de la concentration du luminophore par l'approche de l'efficacité quantique du luminophore.

### 3.6.1 Définition de l'efficacité quantique.

L'efficacité quantique d'un luminophore est définie par le rapport entre le nombre de photons collectés par celui-ci et le nombre de photons réémis. Vu que l'énergie d'un photon dépend de sa longueur d'onde l'efficacité quantique d'un luminophore est normalement représentée sous la forme d'un spectre montrant la valeur de cette efficacité pour chaque longueur d'onde d'absorption du luminophore tel que montre l'exemple mesuré en laboratoire donné sur la figure suivante sachant que le logiciel utilisé dans cette étude garanti, par programmation, une erreur de mesure inférieure à 3% sur les courbes suivantes:



**Figure 60 : mesure de l'efficacité quantique d'un luminophore YAG créé en laboratoire pour différentes longueurs d'onde en nm.**

L'efficacité quantique d'un luminophore peut se définir par la formule suivante :

$$3.1 \quad QE_{\lambda} = N_e/N_v$$

Où  $N_v$  est le nombre de photons absorbés par le luminophore et  $N_e$  est le nombre de photons émis par celui-ci. Ces deux valeurs peuvent être calculées comme suit :

$$3.2 \quad N_v = (\Phi_0/\epsilon_{\lambda})t$$

$$3.3 \quad N_e = (\Phi_{\epsilon}/\epsilon_{\lambda})t$$

Où  $\Phi_0$  correspond à la puissance optique incidente en W,  $\Phi_e$  correspond à la puissance optique absorbée en W,  $\varepsilon_\lambda$  étant l'énergie d'un photon de longueur d'onde  $\lambda$  et t étant le temps en secondes [118].

### 3.6.2 L'efficacité quantique dans l'industrie actuelle.

Actuellement l'efficacité quantique apparaît dans beaucoup de documentations techniques afin de caractériser plus précisément une source lumineuse. En effet celle-ci donne une valeur concrète de l'effet apporté par le luminophore utilisé et permet donc de caractériser celui-ci quelle que soit sa composition intrinsèque. Le problème est que la plupart des articles ou documentations techniques actuelles ne donnent qu'une valeur d'efficacité quantique au lieu du spectre complet comme vu précédemment. Ainsi la valeur donnée est celle obtenue pour la longueur d'onde optimale du luminophore et pour une température fixée généralement sur la valeur ambiante. Il est extrêmement compliqué voire impossible de trouver des résultats sur la mesure ou la modélisation des valeurs d'efficacité quantique pour des longueurs d'onde s'éloignant de la valeur optimale ou pour des températures supérieures à la température ambiante. Le problème des travaux étudiés ici est que les luminophores étudiés ne sont pas totalement connus au départ : il faut donc pouvoir les caractériser afin de pouvoir les reproduire dans le modèle utilisé. Dans LightTools un luminophore peut être défini par son efficacité quantique afin de pouvoir modéliser son comportement face à la source et de l'adapter au mieux aux résultats expérimentaux.

Le but des travaux suivants et donc de créer un modèle de la source lumineuse afin de pouvoir définir celle-ci exactement pour n'importe quel luminophore quel que soient la température de fonctionnement et la longueur d'onde d'excitation. Dans cette optique il faudra mesurer le rendement quantique du luminophore étudié afin de pouvoir l'intégrer au modèle utilisé et pouvoir comparer le résultat obtenu avec celui mesuré expérimentalement.

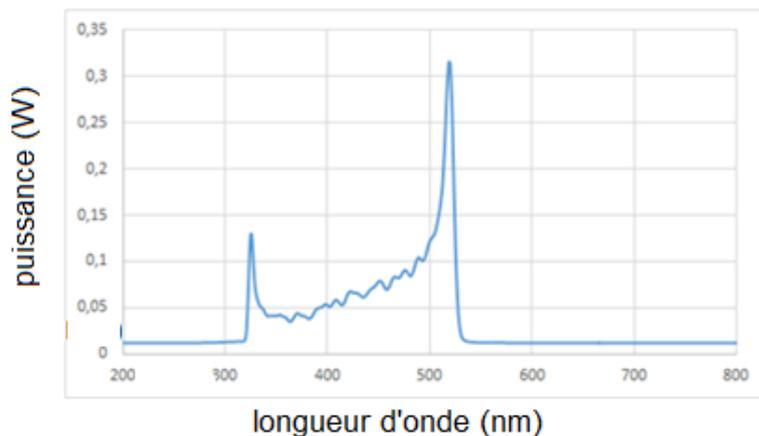
### 3.6.3 Banc de mesure de l'efficacité quantique.

Afin de pouvoir mesurer précisément l'efficacité quantique des luminophores réalisés au sein du laboratoire il a fallu créer un protocole expérimental. Cette partie du projet a été réalisée au campus technologique de l'université Ku Leuven au sein de l'équipe du professeur Youri Meuret. La figure ci-dessous montre le banc de mesure complet qui sera analysé point par point dans la suite de ce chapitre.



**Figure 61 : Banc de mesure de l'efficacité quantique d'un luminophore.**

Le premier composant utilisé est une source laser supercontinuum à large bande spectrale de NKT. Ce laser ayant une puissance optique de sortie de 1,5 W au maximum possède une large bande spectrale allant de 410 nm à 2400 nm. Cependant afin de pouvoir garder cette puissance optique il convient de réduire la largeur de bande. Dans le cadre de mesures d'efficacité la largeur de bande sera réduite au minimum possible avec ce laser, telle que visible dans la figure suivante.



**Figure 62 : Puissance spectrale de sortie du laser superK de Fianium.**

Ensuite la bande spectrale est réduite grâce à un monochromateur superK varia 16 de NKT dont les données techniques, tout comme celle du laser supercontinuum précédent, sont en annexe à la fin de ce manuscrit. Ce monochromateur permet de réduire la bande spectrale du laser à moins de 10 nm de largeur. De plus il est contrôlable par ordinateur et adapté au laser utilisé. La figure suivante montre le superK varia 16 et son logiciel de commande.

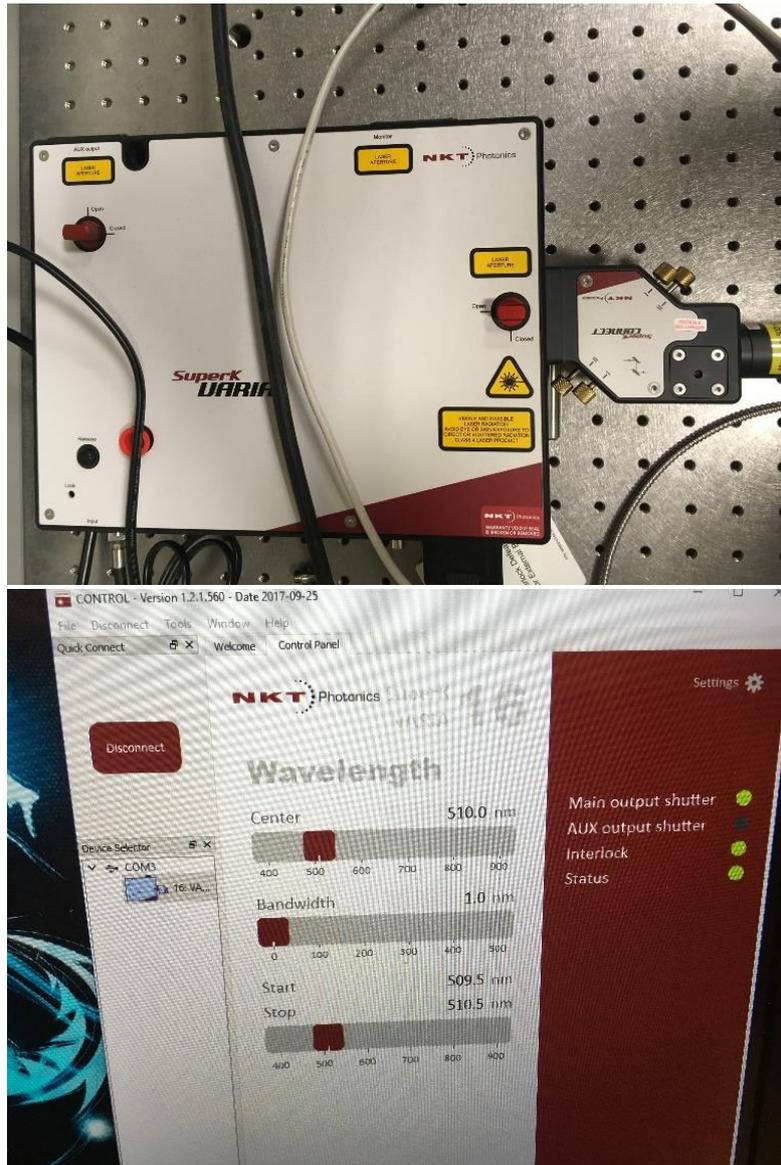


Figure 63 : monochromateur varia 16 de NKT Photonics et logiciel de commande.

Comme le montre la figure précédente une connectique de fibre optique est ajoutée en sortie du monochromateur, c'est cette fibre qui fera au final office de source laser dans la suite de l'expérience les trois composants précédant, le laser, le varia et la fibre optique, ayant été calibrer pour être utilisés ensemble. Ce monochromateur fût utilisé dans le cadre des premières mesures d'efficacité quantique mais sa faible résolution spectrale conduisit à l'ajout d'un autre monochromateur, plus performant, à la suite de celui-ci.

Le monochromateur rajouté en suivant est le TMc300 de Bentham, celui-ci bien plus imposant, permet d'obtenir une largeur de bande spectrale d'à peine 0.4 nm. La faible largeur de bande spectrale s'obtient ici grâce à un jeu de miroirs intégré au monochromateur tel que le montre la figure suivante extraite de la documentation technique disponible en annexe. Avec ce monochromateur la raie laser qui sera utilisé dans la suite de ces travaux pourra être fixée à 1 nm de largeur afin de faciliter le comptage des photons en sortie.

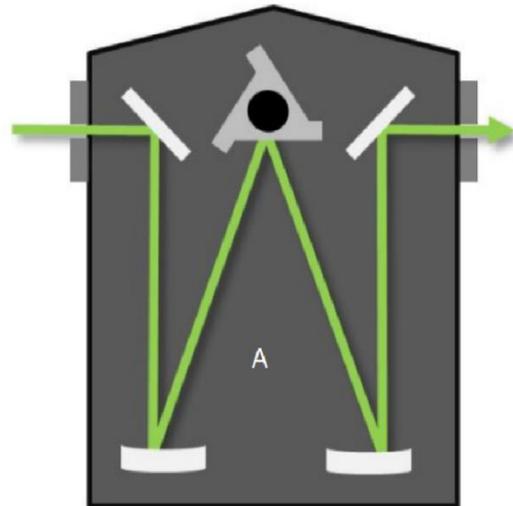
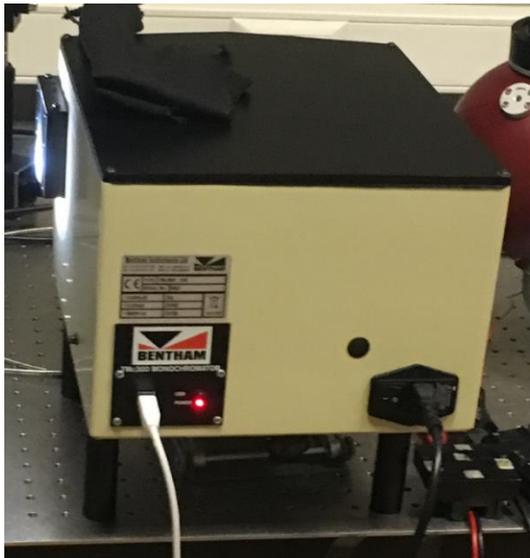


Figure 64 : Monochromateur TMc300 de Bentham et parcours interne du rayonnement lumineux.

En sortie de ce monochromateur la lumière se propage dans le milieu ambiant et non plus dans une fibre optique. Dans le cadre de la modélisation LightTools de cette expérience la source laser sera adaptée dans le logiciel afin de représenter toute la partie allant du laser supercontinuum à la sortie du monochromateur précédant.

Une fois le rayonnement devenu monochromatique, celui-ci est envoyé directement à l'intérieur d'une sphère intégrante LMS-100 de 25 cm de diamètre, illustrée dans la figure suivante.

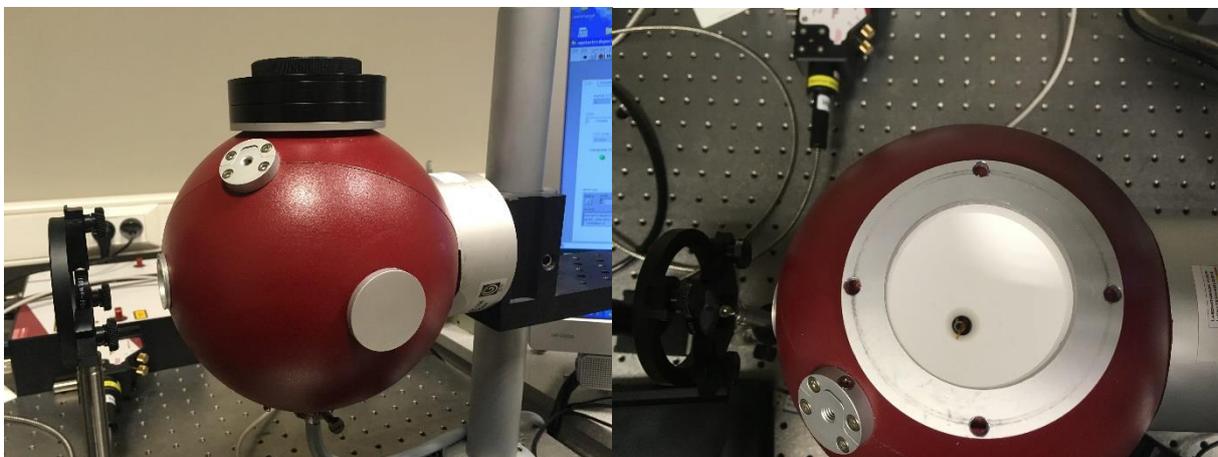


Figure 65 : sphère intégrante LMS-100.

Cette sphère permet des mesures de grande qualité en garantissant un flux interne homogène grâce à une peinture diffusante blanche aussi peu sélective que possible, cette peinture assurant 95% de réflexion pour chaque onde lumineuse située entre 250 nm et 2500 nm. Au centre de cette sphère le luminophore est disposé afin qu'il reçoive directement le rayonnement laser. Enfin au bas de cette sphère une fibre optique récupère le rayonnement obtenu et le transmet à un photodétecteur commandé par ordinateur.

Le photodétecteur utilisé est un iDus 420 BEX2-DD en InGaAs, ce détecteur est utilisé pour son faible bruit de mesure et sa forte valeur d'efficacité quantique, connue et illustrée dans la figure suivante, permettant d'avoir un comptage de photon le plus précis possible.

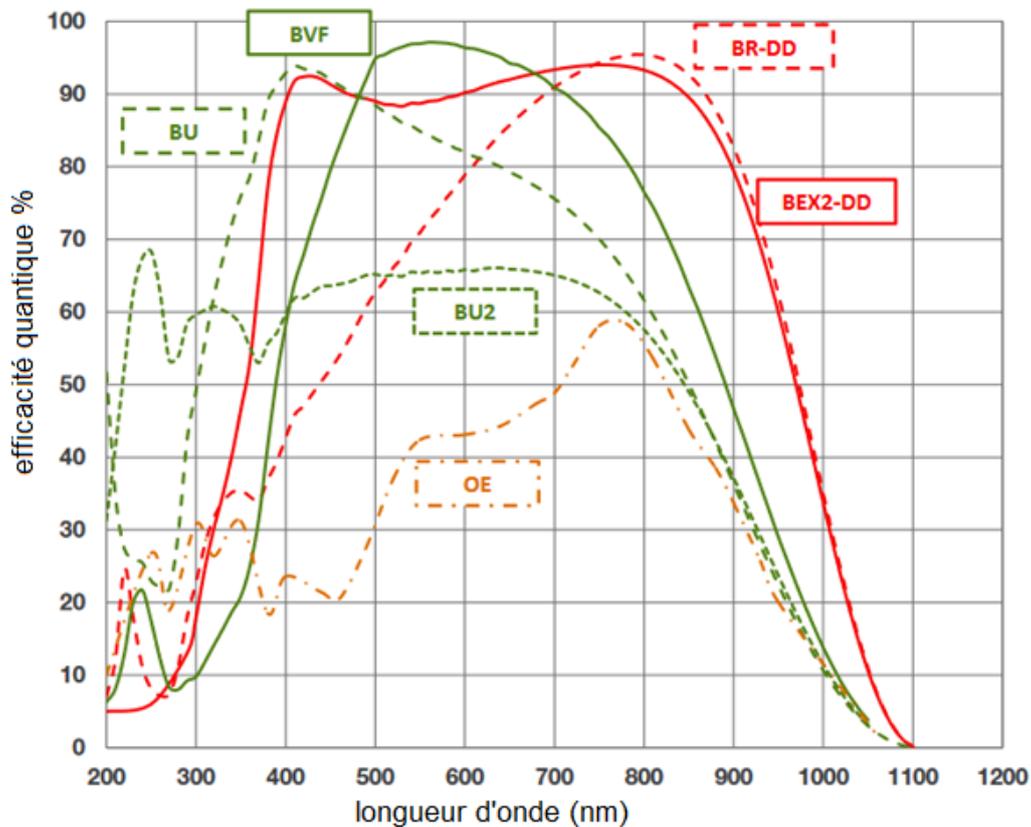


Figure 66 : Rendement quantique pour les photodétecteurs iDus 420 BEX2-DD, en rouge.

Ce photodétecteur fut calibré au début des phases de test ainsi qu'à la fin pour s'assurer de n'avoir aucun changement notable dans les réglages initiaux du banc de test. De plus la température du photodétecteur est contrôlée et fixée à  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  afin d'affiner encore la mesure. Une fois les données récupérées le spectre obtenu est traité sur Matlab afin de pouvoir calculer l'efficacité quantique.

### 3.6.4 Méthode de calcul de l'efficacité quantique.

Le logiciel du photodétecteur utilisé précédemment permet de récupérer une table de valeur de l'éclairement en sortie de la sphère intégrante en fonction de la longueur d'onde, avec un échantillonnage inférieur au nanomètre. La figure suivante montre le spectre obtenu pour un luminophore YAG 10%, avec une longueur d'onde d'émission de 450 nm.

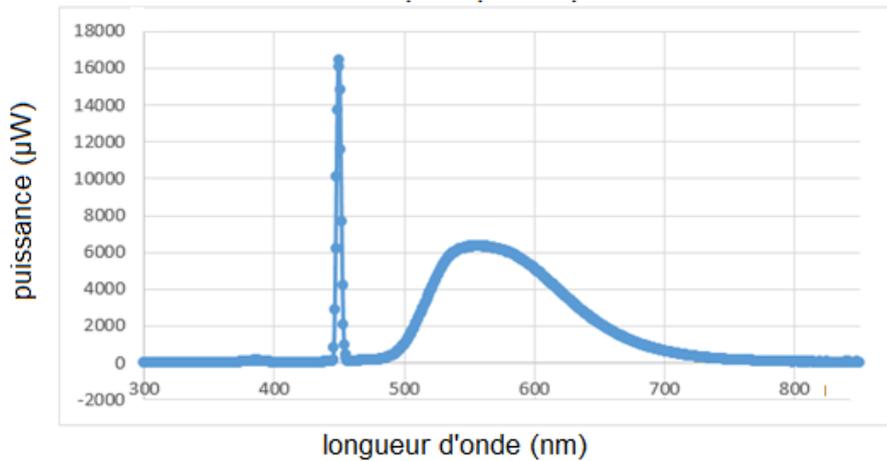


Figure 67 : spectre obtenu pour un luminophore YAG 20%.

Ce spectre montre l'éclairement pondéré par la valeur d'échantillonnage, les données obtenues sont ensuite récupérées pour être traitée dans le calcul de l'efficacité quantique. Afin d'obtenir ces résultats il faut, en plus du spectre obtenu avec le luminophore, un spectre de référence, dans les mêmes conditions, mais où le luminophore est remplacé par le silicium seul, afin de n'avoir que l'impact du liant. La figure suivante montre les deux spectres sur la même courbe.

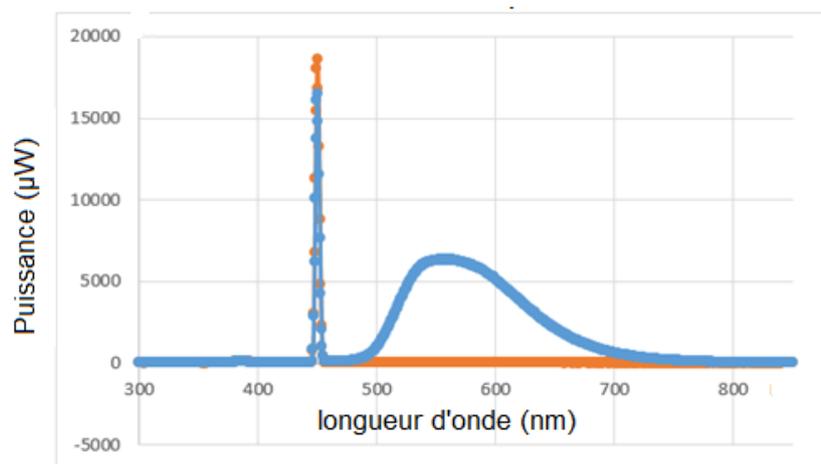


Figure 68 : spectres de référence et du luminophore pour le YAG 20%.

Cette courbe est ensuite divisée en deux parties distinctes pour le calcul de l'efficacité quantique : tout d'abord les longueurs d'ondes englobant la raie laser afin de soustraire la raie laser obtenue avec le luminophore à celle de référence et ainsi obtenir l'absorption, notée  $N_v$  dans la formule 3.1 plus haut. Ensuite l'aire comprenant les longueurs d'ondes situées dans la zone d'émission du luminophore afin de connaître la valeur de l'émission due au luminophore, notée  $N_e$  dans la formule 3.1 précédente. La figure ci-dessous montre spécifiquement les zones intervenant dans ce calcul.

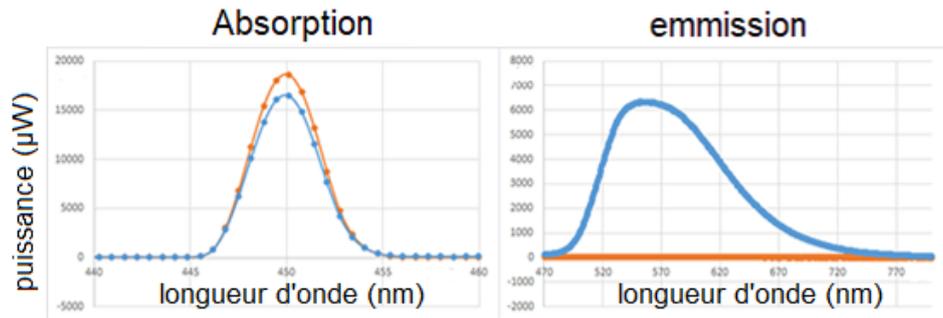


Figure 69 : partie du spectre utilisé, pour le calcul de  $N_v$  à gauche et pour le calcul de  $N_e$  à droite.

Une fois ces zones de calculs définies et les valeurs de  $N_e$  et  $N_v$  obtenue il suffit de diviser  $N_e$  par  $N_v$  pour obtenir l'efficacité quantique du luminophore observé pour la longueur d'onde laser choisie. En répétant ces étapes pour plusieurs longueurs d'onde il devient possible d'obtenir un spectre des valeurs d'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde d'émission du laser. La figure suivante montre ce résultat pour un luminophore YAG fabriqués au sein du laboratoire : ce luminophore est un YAG 10% solide présenté sous forme de pastille de 3cm de diamètre.

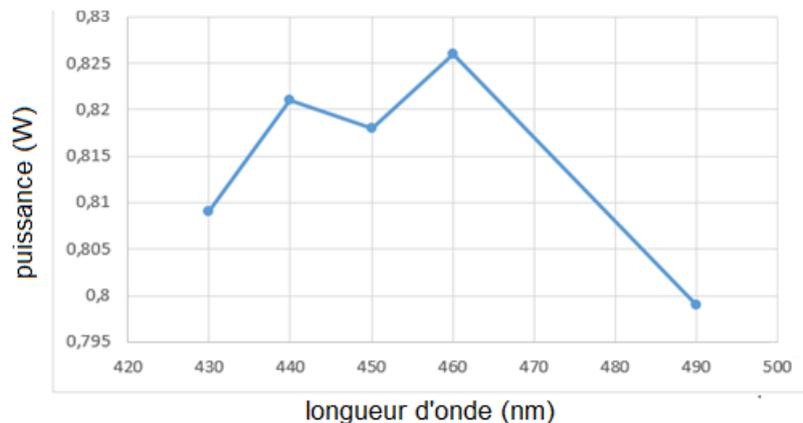
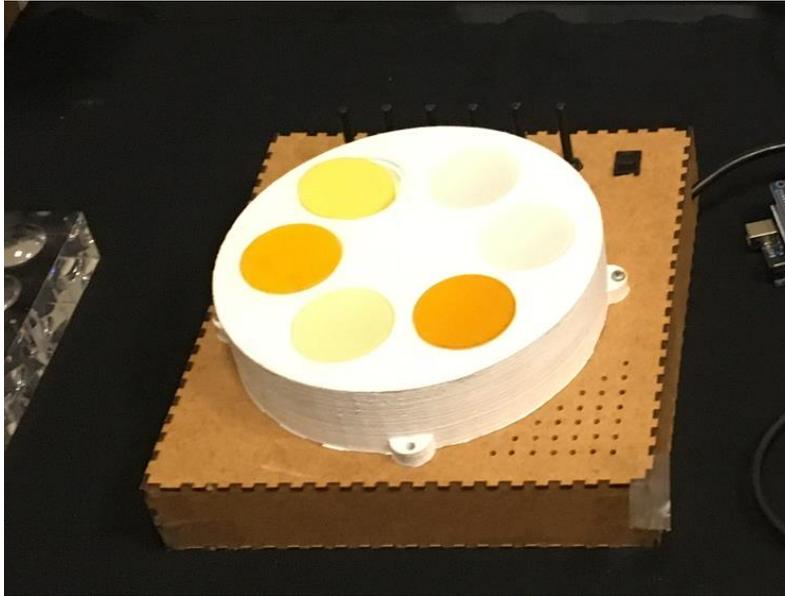


Figure 70 : efficacité quantique d'un luminophore solide YAG 10%.

La courbe précédente fut réalisée afin de valider le banc de test mais montra les limites des mesures des luminophores solides actuels. Pour la suite de l'optimisation du luminophore il a donc fallut commencer par modifier le luminophore afin d'optimiser la mesure.

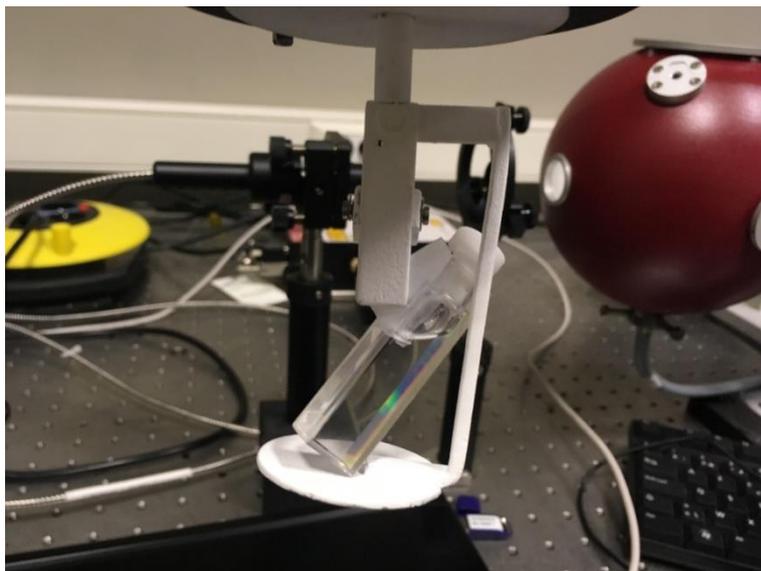
### 3.6.5 Méthode de mesure et d'optimisation.

Le but de cette expérience est de créer une méthode de mesure afin d'optimiser la concentration du luminophore afin d'avoir une efficacité quantique d'au moins 90 sans avoir à changer la composition chimique du luminophore. Dans un premier temps l'échantillon de luminophore est modifié afin d'être adapté à la procédure expérimentale, dans ce but les luminophores solides utilisés jusqu'alors comme le montre la figure suivante doivent être remplacés.



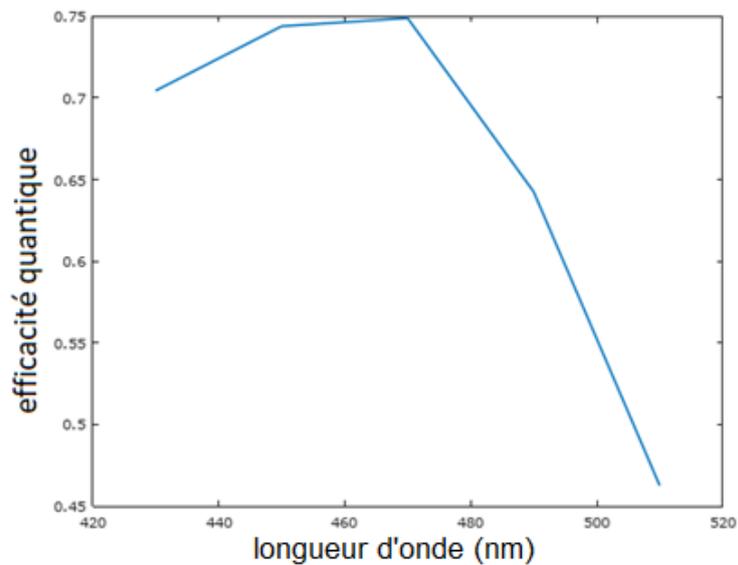
**Figure 71 : luminophores expérimentaux solides.**

En effet le premier défaut de ces luminophores est qu'il faut créer un disque de silicium de même taille pour faire la référence, de plus à chaque modification de la concentration, la procédure de fabrication du luminophore est fastidieuse et demande un certain temps. La solution est d'utiliser un luminophore liquide placé dans un récipient transparent, qui permettrait également de réduire l'impact de l'échauffement dû au laser. Grâce à ces récipients il est possible de réutiliser les échantillons voire de contrôler parfaitement la composition de ces derniers. Ainsi un échantillon de référence a été réalisé, celui-ci restera le même le long des tests. Ensuite pour chaque luminophore le mélange est constitué de poudre de YAG pure mélangée dans du silicium liquide transparent. Ce mélange est contrôlé le long de l'expérience afin de rester homogène. La figure suivante montre l'échantillon de référence ainsi que le support utilisé, celui-ci est recouvert de la même peinture réfléchissante que l'intérieur de la sphère intégratrice.



**Figure 72 : échantillon de référence du luminophore liquide.**

Les premières mesures sont réalisées avec un luminophore YAG concentré à 10% pour cette concentration les documentations techniques industrielles garantissent une efficacité quantique de 90 pour la longueur d'onde d'excitation de 450 nm. Le but de ces mesures est, d'une part de vérifier l'efficacité du banc de test et d'autre part de connaître la variation de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde d'excitation. La figure suivante montre les premiers résultats obtenus pour ce luminophore.



**Figure 73 : efficacité quantique pour un luminophore YAG 10% premiers résultats.**

Ces premiers résultats ne furent pas ceux espérés en effet deux problèmes apparaissent ici : Tout d'abord la valeur maximale d'efficacité quantique est un peu trop faible, elle sera par la suite confirmée et mesurée à une valeur plus élevée. Ensuite théoriquement, même si l'imprécision de la mesure devrait faire chuter la valeur d'efficacité quantique obtenue pour les longueurs d'onde extrêmes, celle-ci devrait tout de même restée supérieure aux valeurs obtenues ici.

La première raison de ces résultats fut trouvée dans le spectre du laser, en effet celui-ci présente un léger décalage en longueur d'onde au fur et à mesure que le temps de mesure augmente. Ce décalage pourrait être dû au système de contrôle de température interne au laser il fut donc décidé d'attendre 30 mn de chauffe avant de commencer les mesures. La figure suivante montre le spectre du laser seul mesuré à intervalles réguliers de 5mn après avoir respecté les 30 minutes ci-dessus.

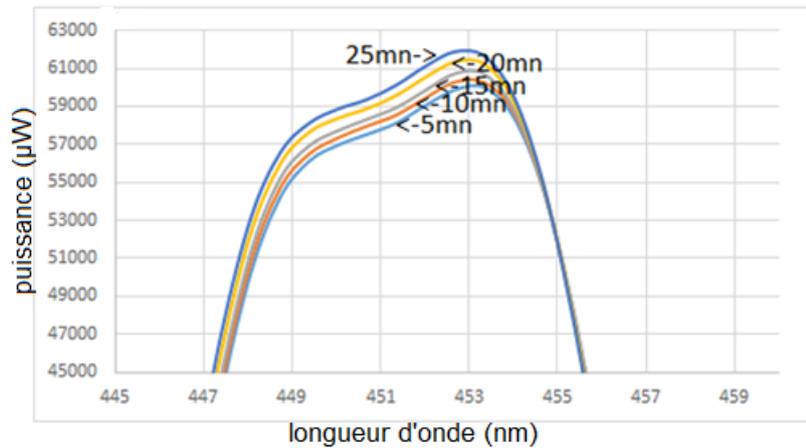


Figure 74 : décalage du pic laser mesuré avec un intervalle de 5mn.

En effet jusque-là le logiciel n'utilisait qu'une mesure de référence, faite en début de test, et du coup durant les mesures l'absorption du luminophore se trouvait surévaluée ce qui diminuait l'efficacité quantique calculée par le programme. C'est ce problème qui justifie la grande baisse de la valeur de l'efficacité quantique pour les grandes longueurs d'ondes, celles-ci étant mesurées en dernier. Le programme de calcul a donc été modifié ainsi que le procédé de mesure afin que la mesure de la référence se fasse avant et en suivant la mesure du luminophore, il faut donc intervertir les deux échantillons pour chaque longueur d'onde au lieu de balayer le spectre entièrement avec un avant de passer à l'autre. Le calcul de l'efficacité quantique se fait donc en faisant au préalable un calcul de la moyenne des deux références mesurées pour la longueur d'onde voulue.

Le second problème lui apparut plus particulièrement pour les valeurs de longueurs d'onde éloignées de la longueur d'absorption optimale. Ainsi dans ces cas-là la valeur d'absorption est très faible et la valeur d'émission est, elle, encore plus basse, de ce fait les approximations de mesure de l'absorption du luminophore deviennent gênantes. La figure suivante montre la partie du spectre concernée pour les deux mesures de référence et du luminophore.

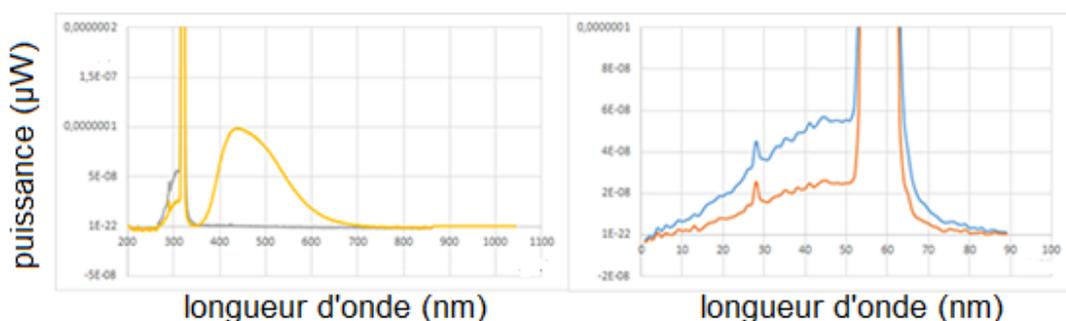


Figure 75 : spectres obtenus pour une longueur d'onde éloignée de la valeur optimale.

Comme le montre cette figure une petite déformation de la raie laser apparaît juste avant cette dernière. Si pour la plupart des mesures cette déformation est négligeable, elle devient problématique quand l'émission du luminophore devient du même ordre de grandeur, il devient alors nécessaire de la compenser ou de l'inclure dans le calcul de l'absorption.

Celle-ci étant due au monochromateur utilisé, il fut choisi de l'inclure au calcul de l'absorption dès lors qu'elle se retrouvait supérieure au bruit de la mesure. Ainsi le programme de calcul fut modifié afin d'inclure dans le calcul de l'absorption une part plus grande du spectre située avant la raie laser. La partie suivante validera ces modifications en comparant l'efficacité quantique obtenue pour deux luminophore réalisés au sein du laboratoire.

### 3.6.6 Mesure de l'efficacité quantique en fonction de la concentration du luminophore.

Le but de cette partie est de valider le banc de test précédent par la mesure de l'efficacité quantique de deux luminophores de composition identique mais de concentration différente. Deux mélanges ont donc été réalisées, tous les deux à base de YAG et de silicium, un avec 20% de YAG pour 80% de silicium et le second avec 1% de YAG pour 99% de silicium. Les mesures seront faites avec une raie laser de largeur de bande 1nm pour des valeurs allant de 430nm à 490nm. La figure suivante montre le spectre de référence et du luminophore 1% pour une raie laser de 450nm, valeur optimale pour le YAG. Cette figure montre précisément les zones du spectre utilisées dans le calcul de l'efficacité quantique.

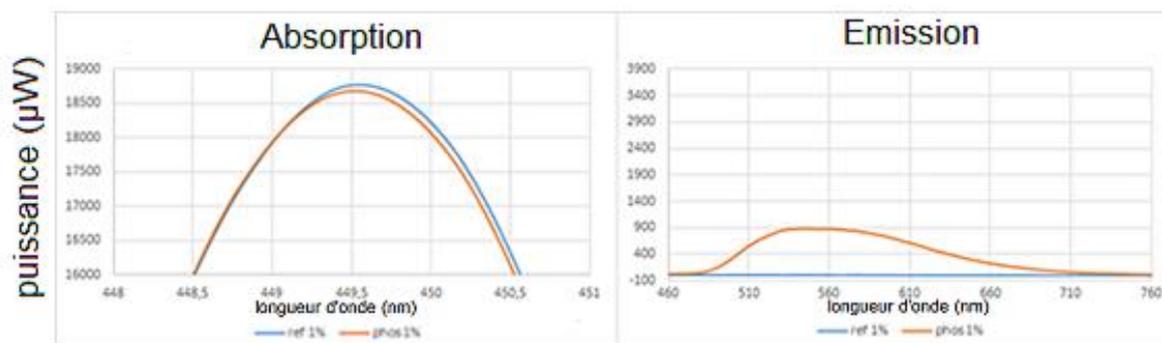


Figure 76 : spectre utilisé pour le calcul de l'absorption et de l'émission du luminophore YAG 1%.

Comme le montre cette figure l'absorption est très faible, tout comme l'émission. Ce résultat est dû au fait que le luminophore est en très faible concentration dans l'échantillon mesuré. Cependant, vu que principalement le YAG impacte l'efficacité quantique, la valeur de celle-ci devrait rester autour de 0,9 si le banc de test est valide. Pour vérifier cette validité un second luminophore, concentré à 20%, fut lui aussi mesuré. Tout comme précédemment, la figure suivante montre les parties du spectre, de référence et du luminophore, utilisées dans le calcul de l'efficacité quantique.

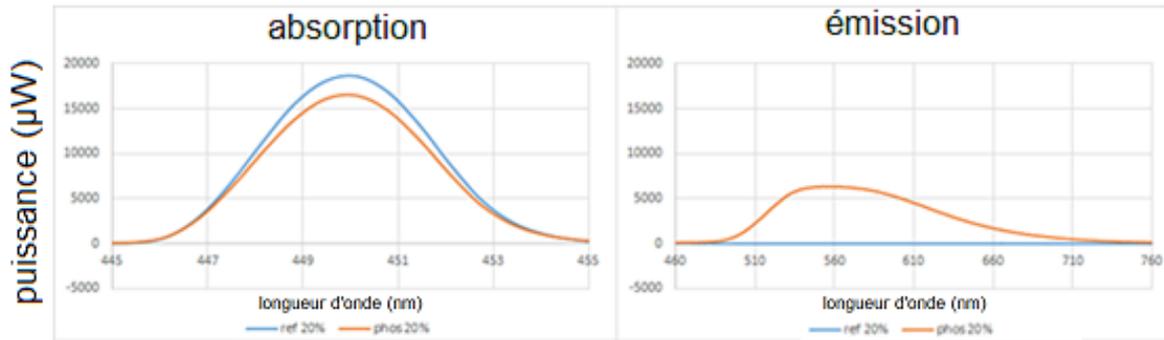


Figure 77 : spectre utilisé pour le calcul de l'absorption et de l'émission du luminophore YAG 20%.

Dans le cas du YAG 20% les valeurs d'émission et d'absorption sont suffisamment importantes pour avoir un résultat convenable malgré de possible erreur de calcul du programme utilisé. De plus ce luminophore correspond à un des luminophore solide les plus répandu dans l'industrie actuelle, le luminophore YAG 20%. De ce fait les documentations techniques données par les fabricants de luminophore donnent généralement les valeurs d'efficacité quantique pour cette concentration. Ainsi c'est la valeur de ce luminophore pour une longueur d'onde de 450nm qui est donnée à 0,9 dans les documentations techniques.

La figure suivante montre l'efficacité quantique obtenue par mesure et calcul pour les deux luminophores précédents. Celle-ci montre la valeur d'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde.

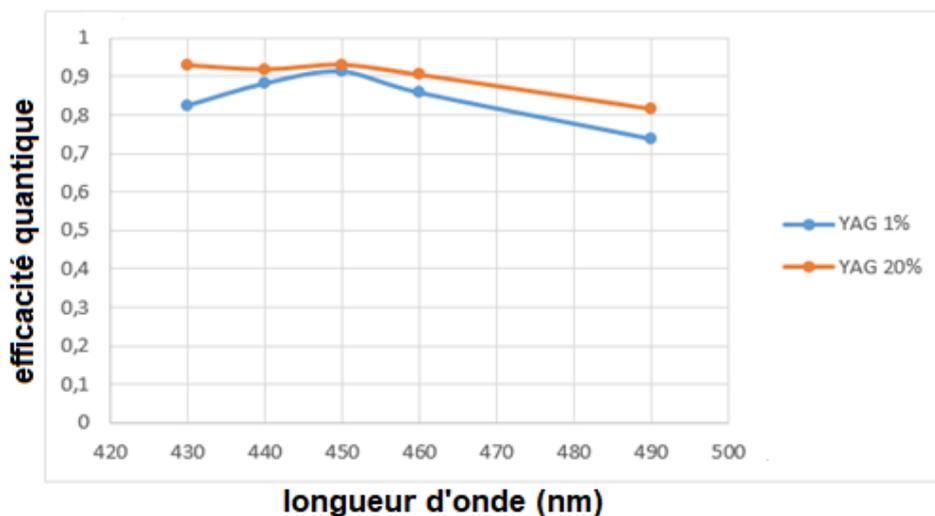


Figure 78 : efficacité quantique obtenue pour les deux luminophores YAG 1% et YAG 20%.

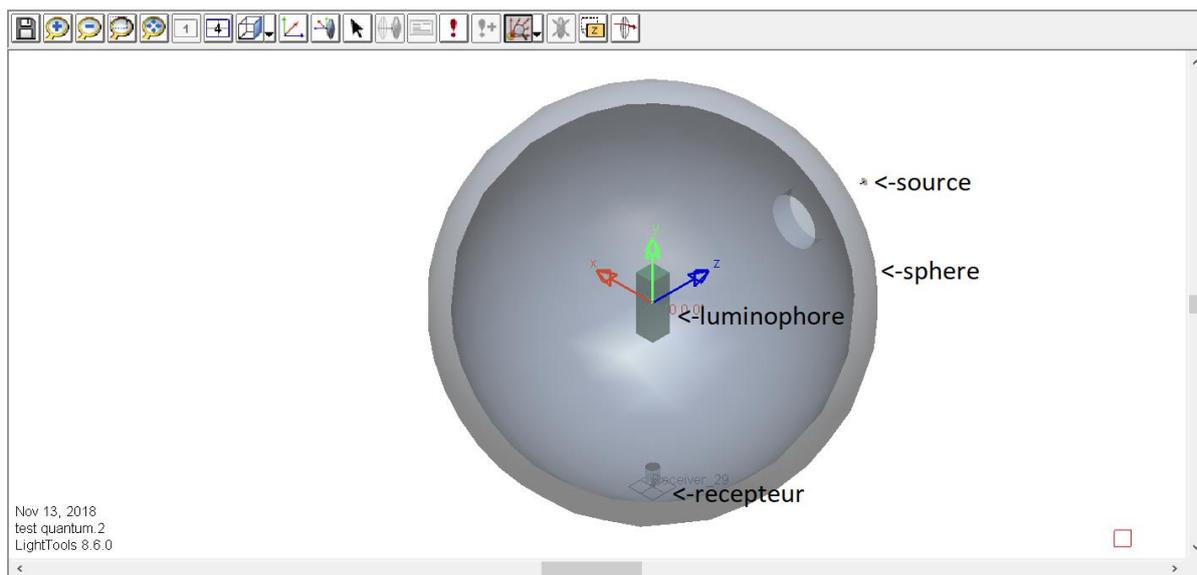
Sur cette figure la valeur d'efficacité quantique obtenue correspond à la documentation technique, dans le cas du YAG 20% pour une longueur d'onde de 450nm, avec une valeur de 0,91. De plus le luminophore 1% donne lui aussi une valeur correspondante à la théorie pour cette longueur d'onde. Par contre les deux luminophore présente une chute de la valeur d'efficacité quantique dès que la longueur d'onde de la raie laser s'éloigne de la valeur optimale. Enfin cette variation semble moins importante dès lors que la concentration du luminophore augmente.

Ces résultats montrent que l'efficacité quantique diminue avec la diminution du nombre d'interactions entre la lumière laser et le luminophore, cet effet pourrait s'expliquer par le fait que pour de faibles interactions du luminophore c'est le liant qui pourrait devenir la principale cause de cette baisse. L'intérêt pour la suite est donc d'avoir un luminophore à forte concentration, ainsi l'efficacité quantique sera la plus constante possible, avant de choisir la composition du luminophore. Ainsi il sera plus facile d'avoir la meilleure efficacité quantique pour une longueur d'onde donnée sans connaître la longueur d'onde optimale du luminophore utilisé. La suite de ce chapitre se portera sur la modélisation du banc de test ainsi que du luminophore, non plus par l'approche de la diffusion de Mie, mais par l'efficacité quantique, puis de voir le rendement quantique obtenu en changeant la concentration du luminophore au sein du modèle.

### 3.6.7 Modélisation du luminophore par l'approche de l'efficacité quantique.

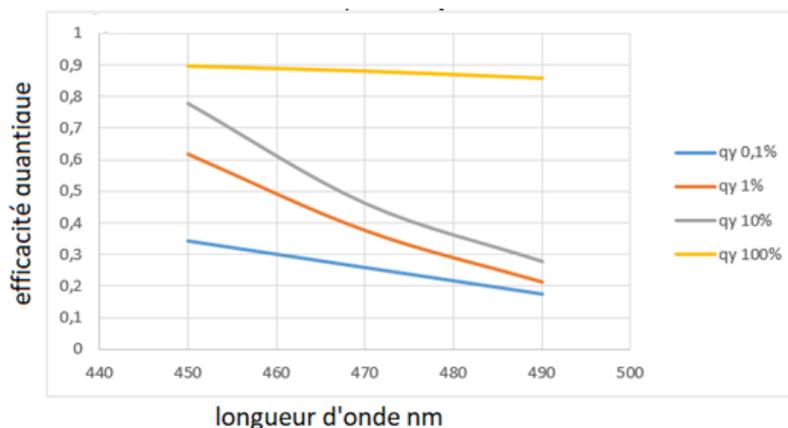
Sur LightTools il est possible de modéliser le comportement optique d'un matériau de deux manières principales : l'approche par la diffusion de Mie, vue précédemment, et l'approche par l'efficacité quantique. Cette dernière présente plusieurs avantages sur la première : tout d'abord elle ne nécessite qu'une valeur pour être utilisée, l'efficacité quantique du luminophore, celle-ci est donc plus simple à modéliser. Ensuite elle correspond à une donnée pouvant être plus facilement connue pour un luminophore industriel que la composition, en effet même si la mesure est incomplète en général, sa valeur est souvent donnée dans les documentations techniques des luminophores. Malgré tout cette méthode n'est pas sans défauts. Il faut en effet connaître la courbe d'efficacité quantique du luminophore modélisé avant de pouvoir le recréer ce qui demande un banc de test similaire au précédent. De plus, la valeur d'efficacité quantique changeant avec la concentration du luminophore, il faudrait à priori mesurer celle-ci pour chaque luminophore de concentration différente.

Le but de ces travaux est de réaliser le modèle du banc de test précédent ainsi que d'un des luminophores observés afin de vérifier si la non-constance de la valeur d'efficacité quantique n'est pas due au silicium utilisé comme liant au sein du luminophore. Ainsi les conditions de test seront modélisées puis un ensemble constitué du modèle théorique du YAG pur et du silicium sera placé dans celui-ci afin de voir si des chutes d'efficacité quantique similaires sont observées. La figure suivante montre le modèle utilisé pour représenter le banc de mesure utilisé pour ce manuscrit.



**Figure 79 : modèle du banc de mesure de l'efficacité quantique.**

Au sein du modèle précédent plusieurs éléments ont été modifiés par rapport au banc expérimental : tout d'abord l'ensemble constitué de la source laser, du monochromateur et du variateur a été regroupé en une source équivalente donnant le faisceau lumineux correspondant en entrée de la sphère intégrante. Ensuite la fibre optique d'entrée du photodétecteur est ici remplacée par un récepteur planaire en sortie de la sphère. Enfin le luminophore est ici représenté par un pavé solide composé d'un mélange de silicium et du matériau créé au sein de LightTools pour représenter le YAG dans ce cas-là. Ce luminophore est constitué de deux matériaux distincts : tout d'abord le silicium, servant de liant, défini directement par LightTools. Ensuite le YAG, défini lui, en fonction de la valeur d'efficacité quantique maximale mesurée précédemment. Celui-ci est donc défini comme ayant une efficacité quantique constante de 0.9 pour chaque longueur d'onde entre 380 nm et 500 nm. Par la suite ce luminophore est comparé au même échantillon mais constitué de silicium seul cette fois-ci, puis le calcul d'efficacité quantique vu précédemment est utilisé afin d'obtenir la courbe d'efficacité quantique théorique de ce luminophore. La figure suivante montre donc la courbe d'efficacité quantique obtenue avec le modèle précédent.



**Figure 80 : efficacité quantique en fonction de la concentration de YAG au sein du luminophore pour des longueurs d'ondes situées entre 450 nm et 490 nm, modèle LightTools.**

Comme le montre la figure précédente, il semblerait que le silicium, constituant le liant du luminophore, ait une influence non négligeable sur l'efficacité quantique de ce dernier. Cependant il ne semble pas que cette influence seule soit la cause de la baisse de l'efficacité quantique dans les cas de faibles interactions au sein du luminophore car le luminophore théorique sans silicium présente tout de même une baisse similaire, bien que moins marquée. Cette baisse doit donc être due aux interactions extérieures au luminophore, comme avec la sphère par exemple, ou au fait que plusieurs interactions consécutives peuvent se produire au sein du luminophore mais leur nombre diminue avec la concentration de celui-ci et avec le nombre d'interactions principales. Malgré cela il est évident que le liant d'un luminophore ne peut être négligé sans augmenter l'erreur d'approximation réalisé en créant le modèle équivalent de ce luminophore. Il est donc important d'en tenir compte au sein de tout modèle de source couplée à ce type de technologie.

## 3.7 Conclusion.

Au sein de ce chapitre plusieurs méthodes de modélisations du couplage diode laser / luminophore ont été observées. L'approche par diffusion de Mie peut être intéressante dans le cas où des changements extrêmes des caractéristiques du luminophore sont proposés. En effet cette méthode ne nécessitant pas d'avoir directement un banc expérimental elle permet de grande libertés dans la modélisation. Le problème est que dans les faits, elle rend difficilement compte des résultats réels et elle ne s'encombre pas des limitations techniques de conception du luminophore. Enfin le nombre de paramètre pouvant être contrôlés reste limité et bien souvent leur correspondance réelle est abstraite. Malgré tout elle semble être une bonne première approche dans le cas d'une nouvelle conception de luminophore.

La seconde méthode étudiée ici s'attardait sur une approche de la modélisation du luminophore par son efficacité quantique. Si normalement la plupart des documentations actuelle des luminophores donnent cette valeur, dans les faits la valeur donnée est souvent insuffisante car partielle. En effet cette valeur est souvent la valeur maximale obtenue pour une seule longueur d'onde bien précise et pour une certaine concentration du luminophore. Or vu la nécessité d'adapter les luminophores actuels à la nouvelle technologie qu'est l'éclairage laser, il est important de pouvoir mesurer et intégrer la vraie valeur d'efficacité quantique au sein du modèle du luminophore. Ces travaux ont permis de définir une procédure de mesure efficace de l'efficacité quantique, ainsi qu'un modèle correspondant. Cette approche à l'avantage de correspondre à des valeurs concrètes de la réalité et donc d'être moins abstraite que la précédente. De plus elle rend directement compte de l'efficacité lumineuse de la source obtenue ainsi que de la transformation effective de la lumière par le luminophore pour chaque longueur d'onde. Ainsi cette méthode semble toute indiquée dans la recherche d'une source lumineuse couplée à un luminophore qui laissera moins de lumière bleue nocive passer en sortie de celle-ci. Malgré tout elle n'est pas sans défauts. Tout d'abord il est ici primordial d'avoir un échantillon du luminophore afin de réaliser une première mesure d'efficacité quantique. De plus il est préférable que celui-ci soit à une concentration importante afin que le liant le constituant est le moins d'influence possible sur la mesure. Enfin cette méthode nécessite de garder une composition du luminophore similaire afin de ne pas avoir à remesurer l'efficacité quantique pour chaque échantillons.

Le chapitre suivant se concentrera sur la caractérisation d'une source constituée d'une diode laser et d'un luminophore. Celui-ci montrera les caractéristiques des luminophores créés et étudiés au sein du laboratoire et montrera les résultats obtenues pour ceux-ci ainsi que les avantages de cette technologie sur les précédentes. Enfin les travaux se concentreront sur l'efficacité lumineuse obtenue et sur les coordonnées chromatiques ainsi que leur stabilité en fonction de la température ou en fonction de la puissance de la diode laser. Enfin ce chapitre conclura sur le bilan de ce manuscrit et sur les perspectives pour la suite de ces travaux.



# Chapitre 4 : Approche expérimentale, choix d'un couple diode laser / luminophore et application d'un exemple précis.

## 4.1 Introduction.

Dans le chapitre précédent, l'accent était principalement sur la caractérisation du luminophore. Plus précisément sur l'impact de la concentration de ce luminophore ainsi que son efficacité quantique. Pour la suite du processus expérimental la diode laser doit elle aussi entrer en jeu. De plus il convient d'étudier un cas abordé lors de la partie modélisation du chapitre précédent : le cas où les luminophores se différencient uniquement sur leur composition chimique. Ce chapitre se consacre donc à la caractérisation d'une source lumineuse constituée, d'une diode laser d'une part, et d'un luminophore d'autre part. La première partie portera sur la diode laser utilisée ainsi que sur le procédé expérimental utilisé. Par la suite celle-ci sera couplée à différents luminophores industriels afin de valider la procédure expérimentale et de définir les paramètres à modifier afin d'adapter les futurs luminophores utilisés. En effet, comme vu au chapitre précédant, ces luminophores industriels sont pensés pour les sources à LED et non les sources laser. Ensuite une mesure des caractéristiques optiques de la source choisie sera réalisée afin de savoir si celle-ci peut correspondre à une future application industrielle. L'exemple utilisé ici sera la création d'une source de lumière blanche spécifique à l'usage au sein de blocs opératoires, ce cas particulier donnant lieu à diverses contraintes précises demandant un éclairage très spécifique. Ces spécificités seront également définies et détaillées dans ce chapitre. Enfin des luminophores créés au sein du laboratoire seront couplés à la diode laser choisie afin de mesurer les coordonnées chromatiques obtenues ainsi que la stabilité en courant de celles-ci. Le spectre obtenu dans chaque cas sera lui aussi analysé et comparé au spectre obtenu pour les autres luminophores. Enfin une fois le bon couple diode laser / luminophore choisi celui-ci sera comparé aux spécifications demandées dans le cadre de l'exemple étudié ici : l'éclairage au sein de blocs opératoires.



## 4.2 Dispositif expérimental.

### 4.2.1 La source lumineuse.

La première chose à prendre en compte pour ce modèle expérimental est que, la source n'étant pas définitive, ni la diode laser ni le luminophore ne sont pour l'instant encapsulés. Ainsi il faut veiller en premier lieu à leur bonne utilisation et à les placer correctement sur le banc de test. Sachant que le luminophore sera amené à être changé souvent il fut choisi que son support serait amovible et située à une certaine distance de la diode laser afin de ne pas dégrader le luminophore étudié. De plus il faudra veiller à l'alignement de celui-ci avec le faisceau laser obtenu en sortie de la diode laser comme le montre la figure suivante.

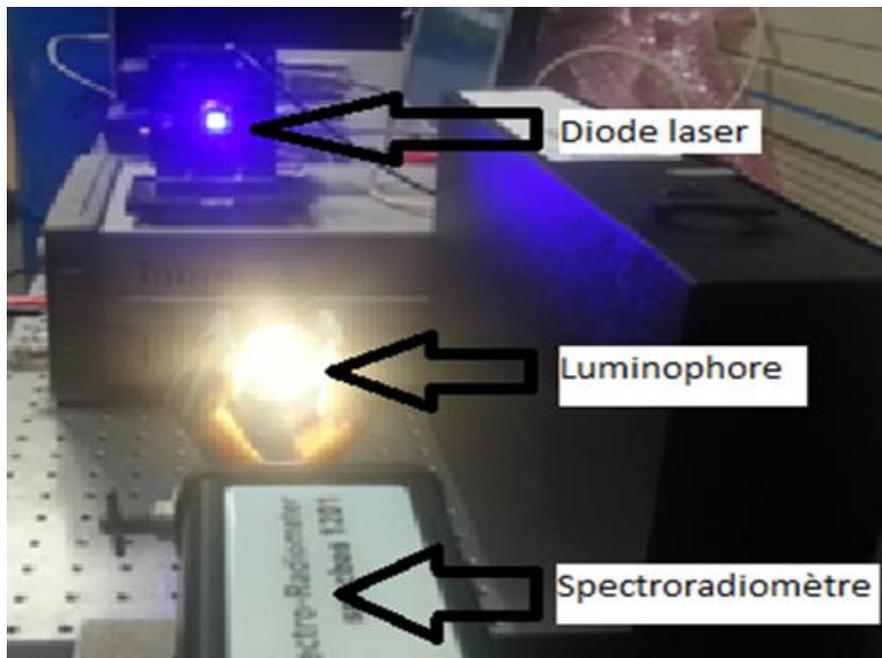


Figure 81 : source expérimentale composée d'une diode laser et d'un luminophore déporté.

La diode laser utilisée ici est celle qui a servi pour le modèle du chapitre précédent à savoir la PL TB450 fabriquée par Osram. Celle-ci produit une raie lumineuse de 450 nm avec une largeur de bande de 4nm environ. Cette diode fournit une puissance optique maximale de 1,7W pour une tension nominale de 5V et un courant maximum de 1,6A. Durant cette expérience elle sera commandée en courant par l'alimentation vue ci-après.

## 4.2.2 L'alimentation de la diode laser.

Afin de réaliser la meilleure caractérisation possible il a fallu choisir une alimentation pour la diode laser permettant le plus de contrôle possible.



Figure 82 : Keithley K2602A.

Le Keithley K2602A ci-dessus est un source-mètre pouvant être contrôlé en tension comme en courant. Les diodes laser pouvant être sujettes, dans une moindre mesure, à l'emballement thermique spécifique des LEDs il est préférable d'utiliser le contrôle du courant dans le cas présent. De plus, cet appareil a l'avantage de pouvoir prendre une grande quantité de mesure en un temps relativement court. Il possède en outre 2 sorties avec une compliance de 40V-1A DC par voie pouvant être utilisées conjointement afin d'augmenter le courant maximal à 2A. Ce faisant cette source peut produire toutes les valeurs possibles spécifiées pour la diode laser, la zone de fonctionnement de celle-ci se situant entre 0,3A et 1,6A pour une tension située entre 4V et 6,8V. Enfin dans le cadre des mesures réalisées ici cet appareil possède une précision de  $\pm 0.05\%$ ,  $+900\mu\text{A}$ , Cette précision n'est pas une nécessité absolue dans le cas présent mais c'est un gage de qualité au niveau des mesures réalisées.

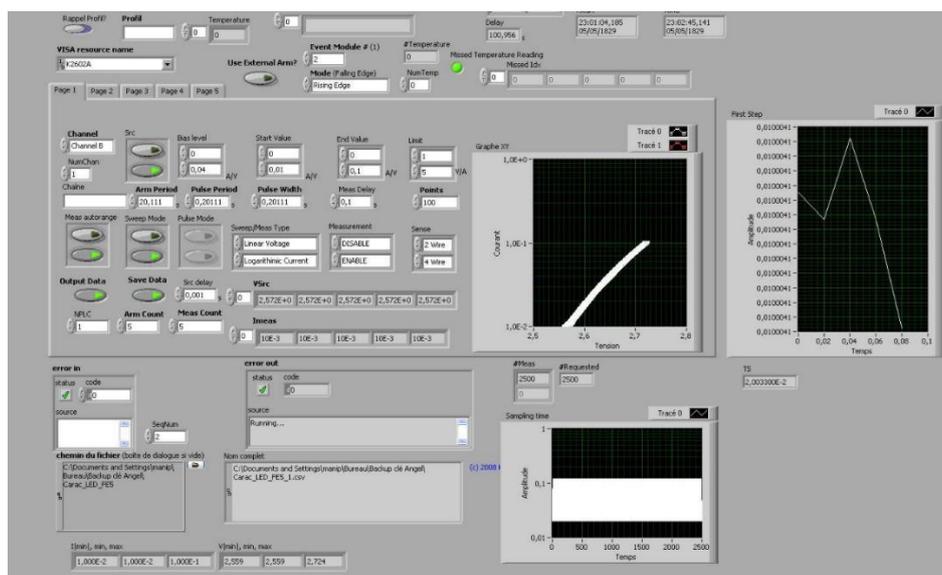


Figure 83 : Interface de contrôle du Keithley sous LabVIEW.

Comme le montre la figure précédente : un autre avantage est que le contrôle de cette source peut être assuré avec le logiciel LabVIEW. De ce fait un programme a été mis au point, au sein du laboratoire, permettant de régler tous les paramètres nécessaires à la caractérisation électrique : nombre de voies utilisées, tension/courant lors de la mesure, valeur de départ et d'arrivée, limite en tension/courant, durée des impulsions ou de la période, nombre de point de mesure, mesure en mode autorange, mesure en mode balayage, balayage du courant/tension linéaire ou logarithmique, mesures en mode 2 ou 4 fils, mesure de la température, utilisation d'un déclencheur extérieur pour les mesures et programmation de forme d'onde particulière.

### 4.2.3 Dissipation thermique par module Peltier : principe.

Lors des premiers essais réalisés il s'est avéré que le radiateur passif utilisé pour la diode laser n'était pas suffisant il fut donc décidé d'utiliser un module Peltier afin de réaliser la dissipation thermique nécessaire au bon fonctionnement de la diode laser. Les modules Peltier mettent en œuvre la thermoélectricité. Un module présente 2 faces, l'une dite « froide » et l'autre dite « chaude ». En présence d'un courant électrique, l'effet Peltier peut se définir par un phénomène physique de déplacement de chaleur comme le montre la figure suivante.

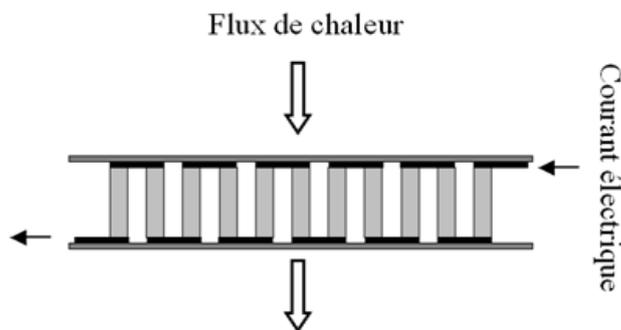
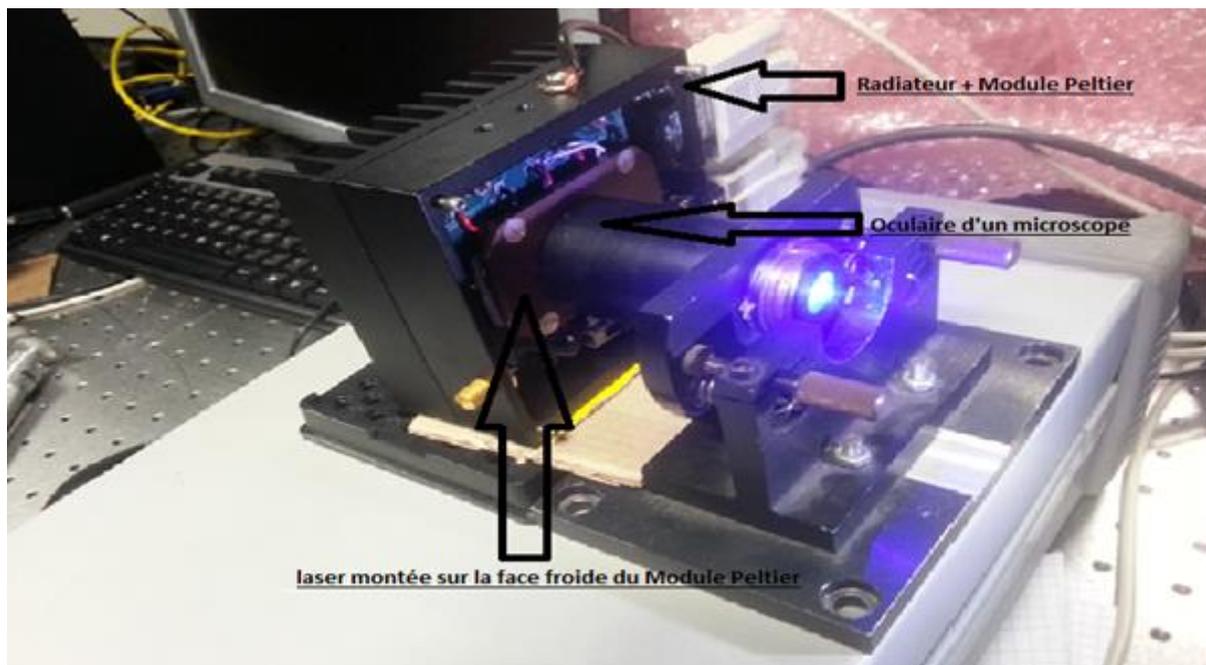


Figure 84 : principe du module Peltier.

Une cellule à effet Peltier est constituée de matériaux semi-conducteurs ainsi que de semelles qui permettent l'échange thermique. Soumis à un courant électrique, une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de nature différente, ici un matériau semi-conducteur de type N et un de type P. Ce qui permet aux électrons de jouer un rôle de fluide caloporteur. Ainsi une absorption et une libération de chaleur peuvent être observées. Celles-ci sont induites par le courant électrique qui circule. Ce phénomène s'explique par le déplacement des électrons du matériau possédant un excès d'électron (type N) vers le matériau possédant un déficit en électrons (type P).

Lorsque les porteurs de charge passent d'un niveau de basse énergie à un niveau plus élevé, l'énergie est absorbée, l'effet Peltier se traduit par un refroidissement de la jonction. Si au contraire, les porteurs de charge passent d'un niveau de haute énergie à un niveau de basse énergie, l'énergie est libérée, ce qui se traduit par un échauffement de la jonction. Cette absorption ou libération de chaleur dépend du sens de la traversée de la jonction par la charge électrique [119].

Ce module permettra de réguler la température de la diode laser afin de la maintenir dans sa zone de fonctionnement. La figure 85 montre la diode laser montée sur le module Peltier.



**Figure 85 : diode laser intégrée au module Peltier.**

Cette figure montre aussi l'optique utilisée en sortie de la diode laser afin de la focaliser. Cela permet d'avoir toute la puissance optique concentrée sur l'échantillon de luminophore utilisé en sortie. En effet à la distance choisie pour placer le luminophore, le faisceau laser fait environ 1cm de diamètre.

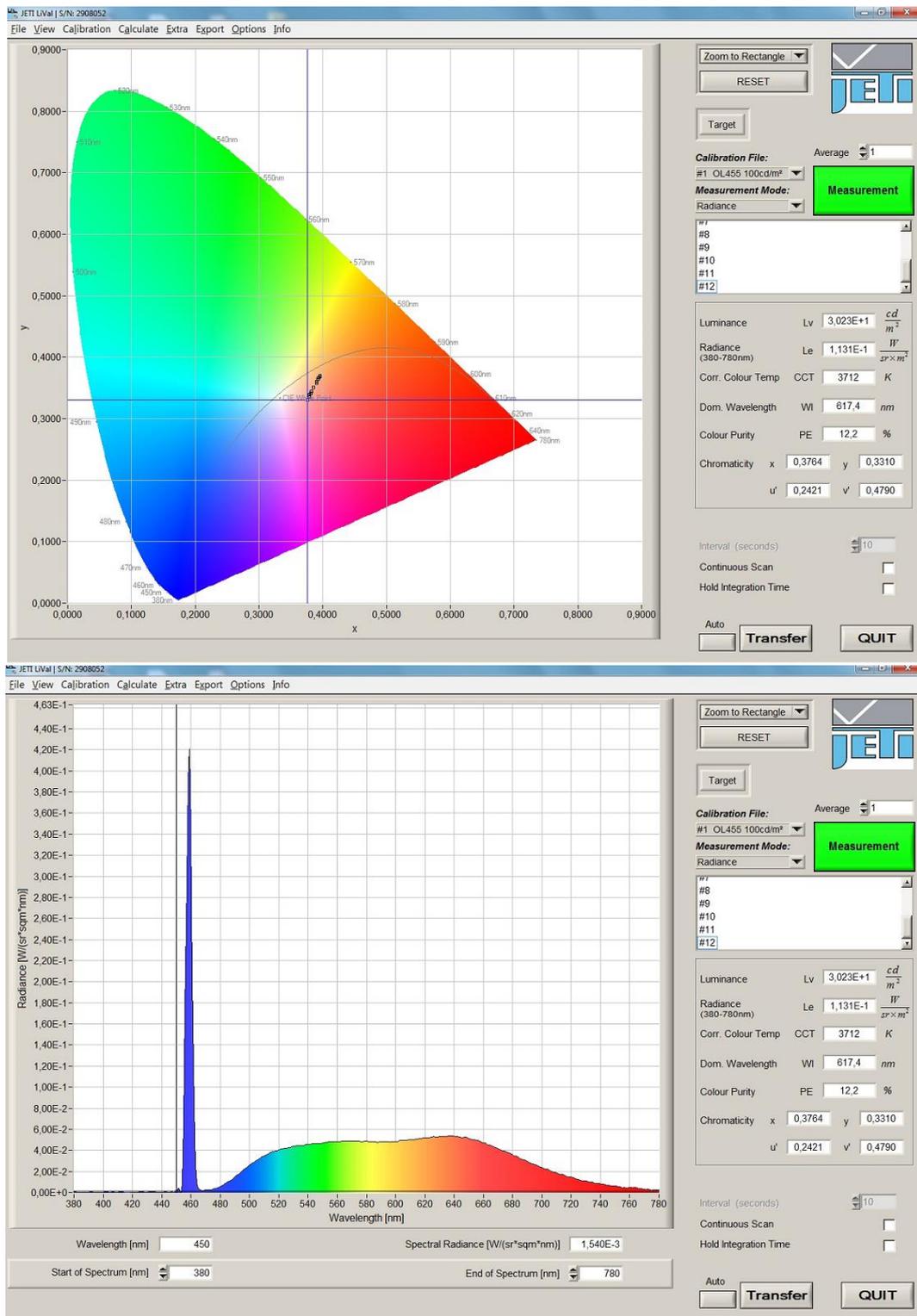
#### 4.2.4 Appareil de mesure : spectromètre.

Le spectromètre Specbos 1201 illustré ci-dessous est un appareil mesurant les radiations dans le domaine visible du spectre électromagnétique, situé entre 380 et 780 nm. Il peut quantifier une valeur de luminance, de radiance, ainsi que les coordonnées chromatiques, la pureté du blanc, la température de couleur corrélée ou encore l'indice de rendu des couleurs. Il possède une résolution de 5 nm et un angle d'ouverture de 1,8°. Il est contrôlable avec le logiciel JETI afin d'obtenir les grandeurs citées précédemment.



**Figure 86 : Spectromètre Specbos 1201.**

Ce spectromètre permet, grâce au logiciel JETI fourni avec, d'obtenir toutes les grandeurs nécessaire pour caractériser la source étudiée. Pour le cas particulier étudié plus bas les caractéristiques importantes sont les suivantes : Les coordonnées chromatiques, ici données en valeur de X et Y mais mesurable aussi en U' et V, l'indice de rendu des couleurs, la température de couleur, le spectre lumineux et la stabilité chromatique en fonction du courant. Ainsi comme le montre les figures suivantes le Specbos 1201 permet, pour chaque mesure, d'obtenir toutes ces informations en une seule fois. Ce dernier est placé dans l'alignement du faisceau laser directement après le luminophore comme le montre la figure 81 vu précédemment.



**Figure 87 : exemple de résultat de mesure des coordonnées chromatiques grâce au Specbos 1201 et spectre correspondant.**

Le banc de test étant défini la suite de ce manuscrit va s'articuler autour de la définition du cahier des charges et des caractérisations du couplage de la diode laser vu précédemment avec différents luminophores expérimentaux et industriels obtenus pour ces expériences.

## 4.3 Mesures et résultats expérimentaux.

### 4.3.1 Spécifications et cahier des charges.

Afin de pouvoir réaliser concrètement une source lumineuse un accord fut passé avec une entreprise, spécialisée, entre autre, dans l'éclairage médical. Le but était donc de leur concevoir un luminaire laser pouvant être utilisé dans un bloc opératoire afin de remplacer les luminaires halogènes utilisés jusqu'alors, ceux-ci n'étant pas exempt de défauts. Dans le cadre d'une opération chirurgicale chaque détails à son importance, il a donc fallu définir les conditions que devait remplir le luminaire afin de répondre au cahier des charges donné.

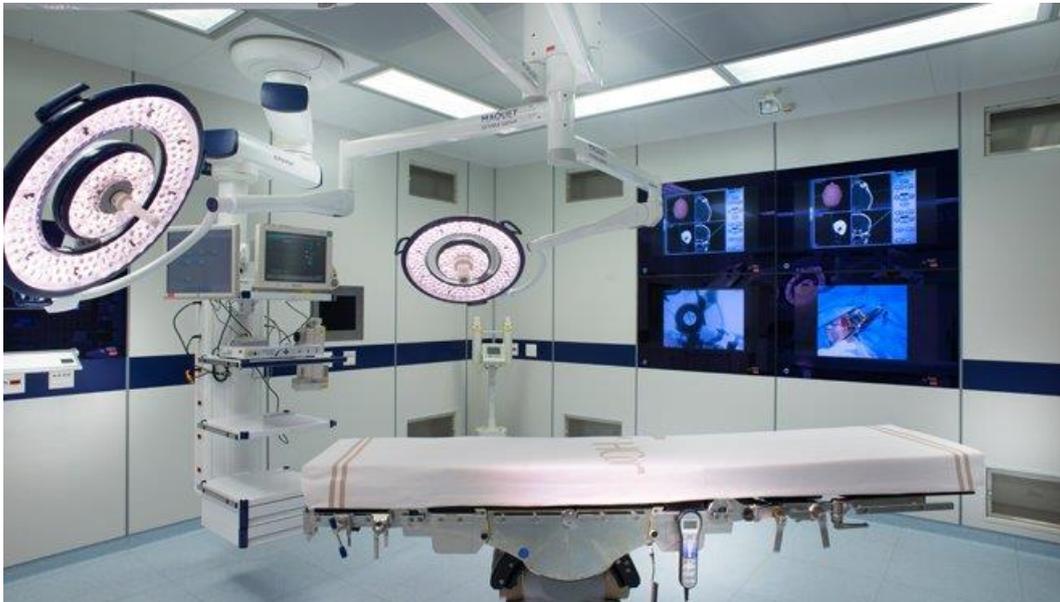
Tout d'abord, afin de limiter au maximum les erreurs d'appréciation, l'éclairage devra être précis et contrôlé. Dans le cas présent, la différenciation des éléments du corps humain s'effectue surtout sur leur luminosité et sur leur couleur. Les contrastes étant très faibles, cela demande un haut niveau de luminance d'environnement (120), ainsi qu'un très bon rendu des couleurs. De plus l'uniformité de l'éclairage sur tout le champ pouvant être parcourus du regard par l'opérateur devra aussi être assurée afin d'éviter au maximum les troubles visuels dû à des différences de luminance trop marquées. Enfin il sera nécessaire d'assurer la présence simultanée de composante rasante et perpendiculaire pour une meilleure distinction des reliefs de la zone observée.

Dans le cadre d'une application médicale, l'indice de rendu des couleurs ou IRC demandé est de minimum 90 dans le but de permettre une bonne reconnaissance des couleurs. La température de couleur demandée correspond aux valeurs utilisées actuellement dans le domaine médical afin de ne pas avoir de changement brutal par apport aux habitudes des chirurgiens actuels. Dans un premier temps cette valeur est fixé autour de 5000K cela correspondant à un blanc neutre se rapprochant de ce qui est habituel dans le milieu médical tout en restant une lumière « neutre » comme le montre la figure suivante. Par la suite une fois le meilleur couple diode laser / luminophore choisi, ses coordonnées chromatiques seront comparée à un ensemble de valeurs acceptables défini par le cahier des charges.



Figure 88 : température de couleurs usuelles dans plusieurs types d'intérieurs [121].

Cette source devra par ailleurs éviter au maximum les ombres portées sur la zone d'opération, main, visage du chirurgien, instruments, zone opérée, pour cela il faudra un éclairage avec un grand angle spatial. La méthode utilisée actuellement pour obtenir un grand angle spatial est, comme le montre la figure 89, d'avoir plusieurs « bras » sur le luminaire, chacun comportant la même source lumineuse.



**Figure 89 : exemple de luminaire de bloc opératoire [122].**

Ce luminaire étant constitué de plusieurs sources identiques, ce sujet ne s'attarde que sur une seule, pouvant par la suite servir de référence pour le luminaire final. Cependant, vu qu'une forte lumière avec un grand champ lumineux a de fortes chances de produire des reflets pouvant gêner l'opérateur, il faudra limiter le diamètre du champ lumineux entre 20cm et 35cm par source.

En dernier lieu, et c'est une des raisons principales de la volonté de remplacer les luminaires à halogènes, il faudra minimiser le rayonnement infrarouge émis par la source de lumière afin d'éviter le dessèchement dû au rayonnement thermique émis par les lampes. La suppression de ce rayonnement profitera aussi à l'opérateur qui peut subir, lors d'expositions prolongées, des augmentations de température conséquentes au niveau de la tête.

Connaissant toutes ces contraintes l'intérêt de la source laser est double : tout d'abord ces sources jouissent d'une stabilité chromatique supérieure aux LEDs tout en étant moins sensibles à l'emballement thermique. Puis ces sources lumineuses possèdent l'avantage de ne pas produire de rayonnement infrarouge.

### 4.3.2 Luminophores expérimentaux NCU Taiwan.

Les premiers luminophores à avoir été testés furent les différents luminophores créés au sein de la National Central University de Taiwan. En effet le laboratoire présent sur place permis de réaliser différents échantillons, en l'occurrence 8, de 3 épaisseurs différentes. Ceux-ci se présentaient sous forme de pastilles de différentes compositions et épaisseurs, ces dernières étant fixées à 0,4mm, 1mm ou 1,6mm pour un diamètre de 18mm. Ces luminophores purent être fixés directement sur le spectromètre afin d'éviter toutes réflexions parasites entre le luminophore et l'entrée du Specbos 1201. La figure suivante montre les échantillons de luminophore créés pour cette étude.

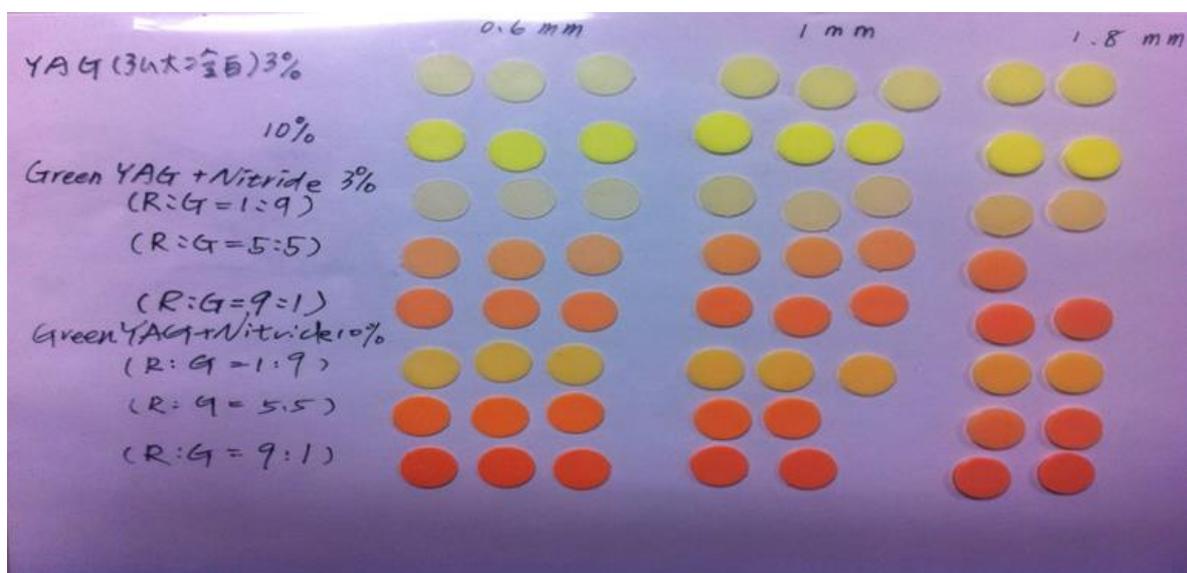


Figure 90 : Luminophore créés à la NCU de Taiwan.

Il s'est avéré par la suite que seule l'épaisseur la plus importante avait une chance de donner un résultat utilisable. En effet, la transmittance directe des échantillons minces était trop élevée pour obtenir de la lumière blanche.

Pour chaque luminophore le spectre obtenu est observé. De plus les coordonnées chromatiques sont relevées afin de savoir si la source obtenue correspond à une valeur de blanc suffisante. La figure suivante montre les différents spectres d'émission des luminophores ainsi que les coordonnées chromatiques mesurées pour un courant nominal d'entrée de 0,8A.

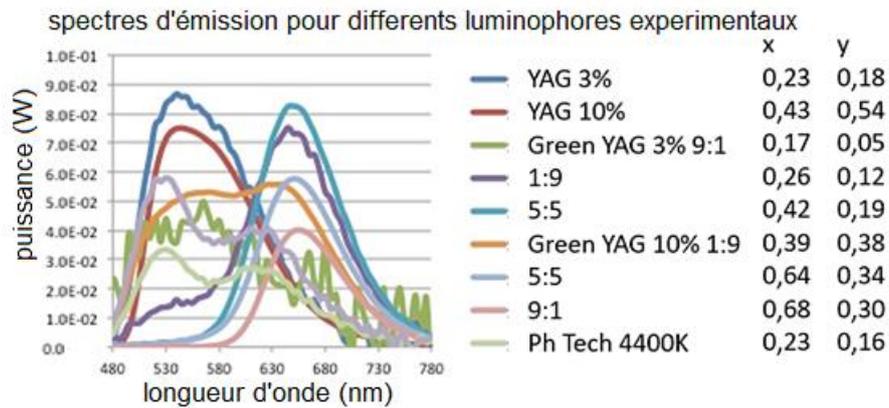


Figure 91 : spectres d'émission des différents luminophores réalisés à Taiwan en  $W/(sr.m^2)$  par nm.

La figure précédente montre les spectres d'émission des luminophores réalisés au sein du laboratoire et les compare à celui observé pour un luminophore industriel fourni par Phosphor Tech. Sur cette figure il apparaît que seul un luminophore semble fournir une couleur blanche proche du cahier des charges une fois couplé à la diode laser : le Green YAG 10%, celui-ci aillant des coordonnées chromatiques de  $x=0,39$  et  $y=0,38$ , donnant une température de couleurs de 4400K environ. Ce luminophore fut donc choisi pour la suite des mesures afin de connaître plus spécifiquement ses caractéristiques. Le spectre spécifique à ce luminophore apparaît sur la figure suivante, le courant nominal étant fixé à 0,8A.

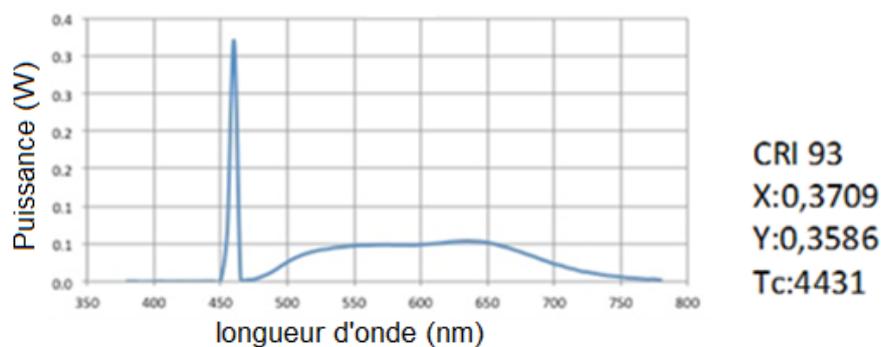
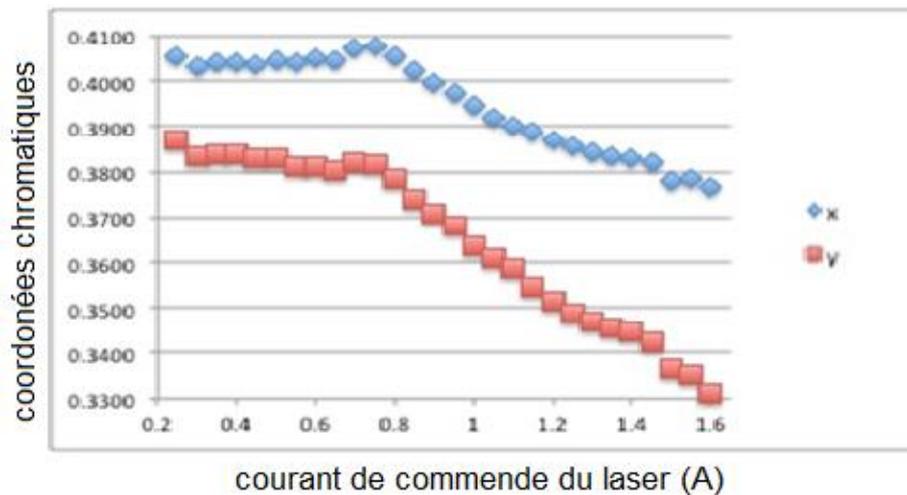


Figure 92 : spectre obtenu pour le couplage de la diode laser avec le luminophore Green YAG 10% en  $W/(sr/m^2)$  par nm.

Ces résultats montrent plusieurs choses: tout d'abord la température de couleur n'est pas optimale, étant de 4431K au lieu des 5000K demandés en première approche. Ensuite comme démontré par la modélisation la raie laser reste bien trop importante, celle-ci pouvant comporter un risque pour les yeux de l'utilisateur. Enfin l'indice de rendu des couleurs s'avère lui tout à fait convenable avec une valeur de 93, supérieure au minimum demandé.

Malgré les défauts observés l'étude peut se poursuivre sur l'influence du courant sur les coordonnées chromatiques. En effet les problèmes précédent pourront être réglés si une bonne

stabilité chromatique en fonction du courant est assuré sur la source, le domaine d'application n'autorisant pas de variation de rendu en fonction des fluctuations du courant. La figure suivante montre la variation des coordonnées x et y en fonction du courant nominal dans la diode laser.



**Figure 93 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore Green YAG 10% en fonction du courant nominal en Ampère.**

Cette figure montre que les coordonnées chromatiques varient selon deux schémas : de 0,2A à 0,78A la variation des coordonnées est très faible, alors que, au-delà de 0,8 A ces mêmes coordonnées baissent drastiquement. Cela se traduit par un décalage vers le bleu. Ces résultats peuvent s'expliquer par un sous dimensionnement du luminophore. Dans le premier cas celui-ci est capable de transformer une partie suffisante de lumière laser donnant en sortie une lumière blanche avec une forte valeur d'IRC. Alors que dès que la valeur de courant dépasse les 0,8A le luminophore sature et ne peut plus transformer de photons bleu supplémentaires. Dès lors augmenter le courant nominal revient juste à augmenter la part de lumière bleue obtenue en sortie, résultant en un décalage des coordonnées chromatiques. La solution la plus simple pour remédier à ce problème serait d'augmenter l'épaisseur du luminophore mais cela n'est pas possible avec les moules possédés actuellement par le laboratoire. Ce luminophore aillant par ailleurs une valeur de température de couleur trop faible il fut abandonné au profit des suivants.

### 4.3.3 Luminophores industriels Phosphor Tech.

Grace aux tests réalisés avec les luminophores expérimentaux il fut possible de commander une composition de luminophore plus précise auprès de différents industriels. Le premier à voir le jour fut réalisé par Phosphor Tech et se présentait sous la forme de feuille de 0,2mm d'épaisseur. La figure suivante montre le luminophore tel qu'il se présente, placé entre deux plaques de verre transparentes afin de pouvoir le tenir sur le porte échantillon.



Figure 94 : feuille de luminophore Phosphor Tech 5500K-96 encapsulé dans deux plaques de verre transparentes.

La composition exacte de celui-ci ne pouvant être obtenue auprès du constructeur les seules informations étaient qu'il était prévu pour donner une température de couleur de 5500K avec un indice de rendu des couleurs de 96. Le problème étant que ces résultats furent obtenus par le constructeur en utilisant une LEDs bleue de puissance optique équivalente à la diode laser Osram utilisé lors de ces mesures. Afin de minimiser ces différences il fut décidé de doubler l'épaisseur de luminophore utilisée. La figure suivante montre le spectre obtenu pour ce luminophore pour un courant nominal de 0,8A.

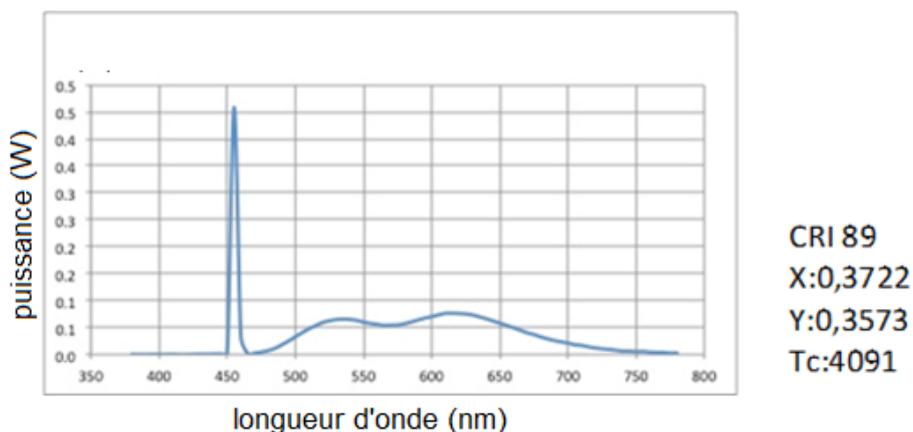
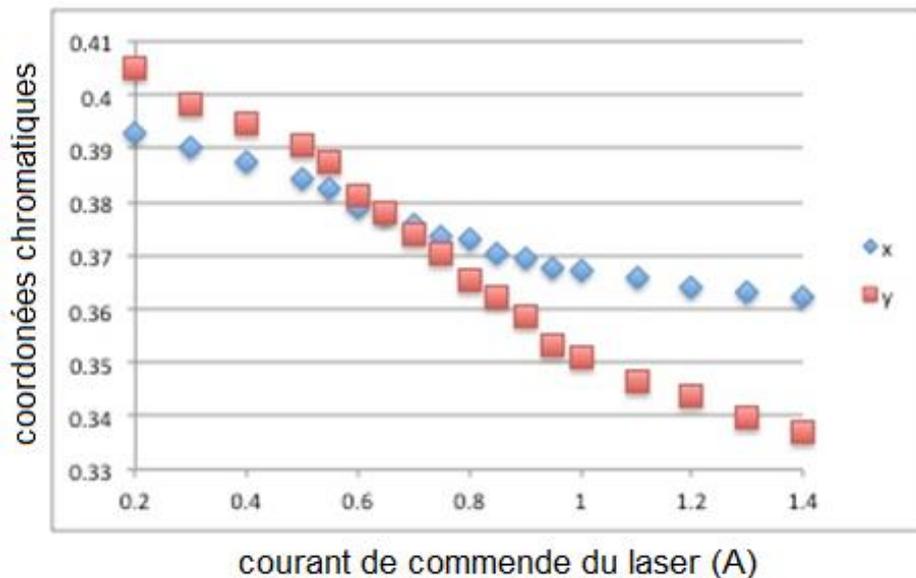


Figure 95 : spectre obtenu pour le couplage de la diode laser avec le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en  $W/(sr/m^2)$  par nm.

Les résultats précédents montrent une fois de plus une valeur de température de couleur inférieure à celle voulue. Celle-ci est même encore inférieure à la précédente. De plus cette fois-ci l'indice de rendu des couleurs est lui aussi trop faible avec 89 pour une valeur attendue d'au moins 90. Malgré tout, et pour conforter les observations obtenues pour le luminophore précédent, la dépendance en courant des coordonnées chromatiques fut une fois de plus étudiée. La figure suivante montre les résultats obtenus.



**Figure 96 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en fonction du courant nominal en Ampère.**

Bien qu'une baisse des coordonnées chromatiques fût à prévoir, celle-ci s'avère bien plus importante que prévu. De plus elle apparaît dès les faibles valeurs de courant. Enfin le croisement des valeurs de x et y lors de l'augmentation du courant semble démontrer que le sous-dimensionnement du luminophore n'est pas la seule cause de la dérive observée.

Après vérification auprès du constructeur, celui-ci conseilla de remplacer les plaques de verre utilisées par du quartz transparent. En effet après vérification il apparaît que la température du luminophore dépasse celle préconisée par Phosphor Tech et le quartz devrait permettre de réduire l'impact de cette dernière. La mesure précédente fut donc refaite cette fois-ci en encapsulant le luminophore entre deux plaques de quartz. La figure suivante montre le résultat obtenu et le compare à celui obtenu précédemment.

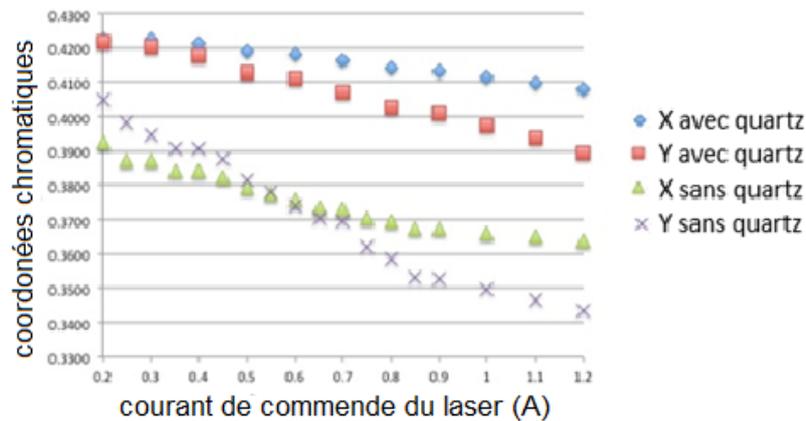


Figure 97 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en fonction du courant nominal en Ampère dans le cas d'une encapsulation du luminophore par quartz ou par verre.

Cette fois le résultat est bien conforme aux prédictions avec des valeurs de coordonnées chromatiques qui semblent stable pour les valeurs de courant faibles avant de décroître une fois la valeur d'absorption maximale du luminophore atteinte. Cependant un autre problème apparaît : du fait de l'absorption du quartz lui-même, les coordonnées chromatiques obtenues sont supérieures aux précédentes, cela dit cet effet étant constant il n'influence pas les variations de coordonnées chromatiques.

Afin de vérifier l'existence du « seuil » d'absorption du luminophore il convient de refaire une dernière fois la mesure des coordonnées chromatiques en veillant cette fois à prendre suffisamment de mesures pour les petites valeurs de courant. La figure ci-dessous montre le résultat obtenu pour ces mesures.

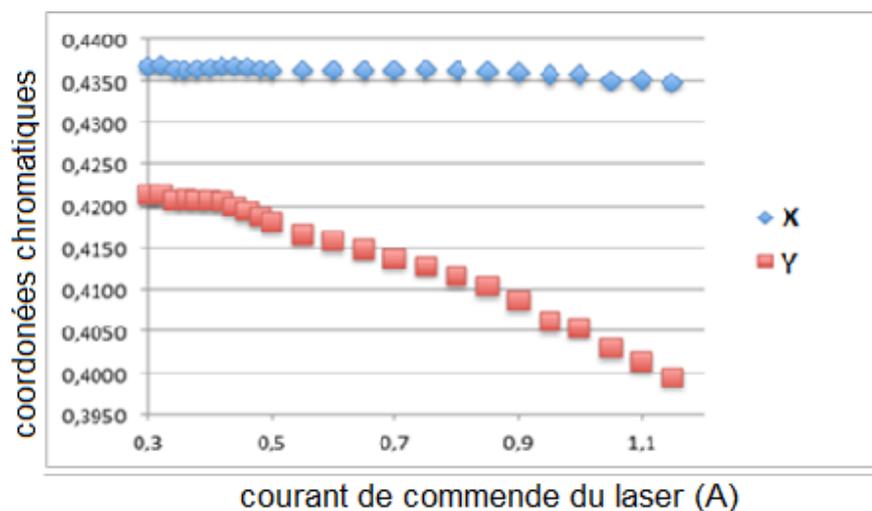


Figure 98 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech en fonction du courant nominal en Ampère dans le cas d'une encapsulation du luminophore par quartz.

Sur la figure précédente le seuil de saturation du luminophore apparaît clairement pour un courant nominal de 0,46A. Ces résultats confirment donc l'hypothèse affirmant que le luminophore est sous-dimensionné. Il faudra donc s'assurer par la suite de correctement choisir les paramètres du luminophore, en particulier l'épaisseur et la concentration. Ne pouvant pas changer l'épaisseur du luminophore et étant limité par les délais de fabrication, ce luminophore fut lui aussi abandonné.

#### 4.3.4 Luminophores Intematix.

Afin de ne pas rencontrer à nouveau la situation précédente, une étude de marché fut réalisée afin de trouver un industriel, spécialisé dans les fortes puissances optique, capable de répondre au cahier des charges voulu. Le choix final se porta sur les luminophores « chromalit » d'Intematix. En effet Intematix a développé cette forme de luminophore afin de l'utilisée pour des réseaux de LEDs de plus grande puissance optique. Ceux-ci seraient donc plus adaptés au laser que les précédents. La figure ci-dessous illustre ce nouveau modèle de luminophore proposé par Intematix.



**Figure 99 : Luminophore « chromalit » proposé par Intematix.**

Cette forme de luminophore, appelée chandelle, permet en outre de vérifier une modélisation proposée au chapitre 3. En effet cette forme fait que la raie laser est plus atténuée au centre du luminophore qu'au pourtour de celui-ci. Ce modèle devrait donc présenter une raie bleue en sortie plus faible que les luminophores précédents.

Intematix proposa alors plusieurs luminophores réalisables. Le tableau suivant les répertorie ainsi que les valeurs de bases fournies par le constructeur.

Product	CCT (K)	Color Consistency		Min CRI	Minimum Conversion Efficacy (lm/W <sub>rad</sub> ) at 25°C	Typical Conversion Efficacy (lm/W <sub>rad</sub> ) at 25°C
		SDCM	CCT (K)			
CL-827	2700	3	±70	80	170	180
CL-927	2700	3	±70	90	155	165
CL-830	3000	3	±90	80	185	200
CL-930	3000	3	±90	90	160	170
CL-835	3500	3	±110	80	195	205
CL-840	4000	3	±120	80	200	210
CL-750	5000	4	±170	70	215	225

Tableau 6 : différents luminophores proposés par Intematix.

Le problème apparaissant avec ce tableau est que Intematix ne pouvait pas garantir un fort indice de rendu des couleurs pour une température de couleur supérieure à 3000K. après avoir soumis ce problème à l'entreprise cliente il fut décidé de prendre un luminophore avec l'indice de rendu des couleurs le plus haut possible même si la valeur de la température de couleurs étaient insuffisante. En effet si l'indice de rendu des couleurs reste suffisant ce luminophore permettra de vérifier la faisabilité d'une source laser aillant une dispersion chromatique minimale et un indice de rendu des couleurs satisfaisant. De plus il permettra de valider la forme proposée par Intematix ce qui pourrait amener à la réutiliser. Enfin ces luminophore permettent de vérifier expérimentalement un modèle étudié précédemment. En plus de pouvoir déboucher sur une application domestique à défaut de médicale.

Le luminophore choisi fut donc le CL-930 celui-ci aillant les caractéristiques théoriques suivantes :

Une coordonnée x de 0,4338.

Une coordonnée y de 0,403.

Un indice de rendu des couleurs de 90 minimum.

Une température de couleur de 3000K.

La figure suivante montre le spectre obtenu pour un courant nominal de 0,8A.

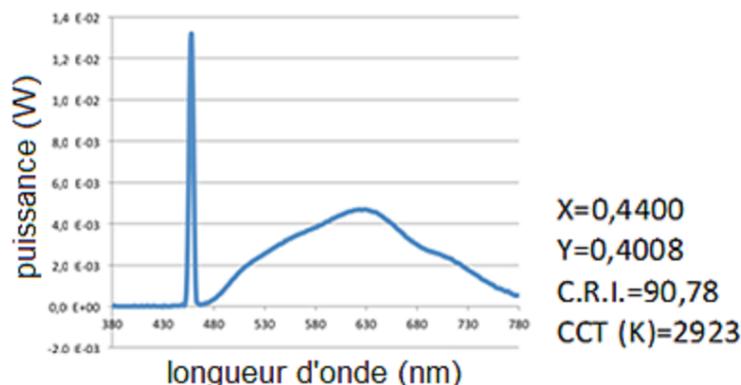
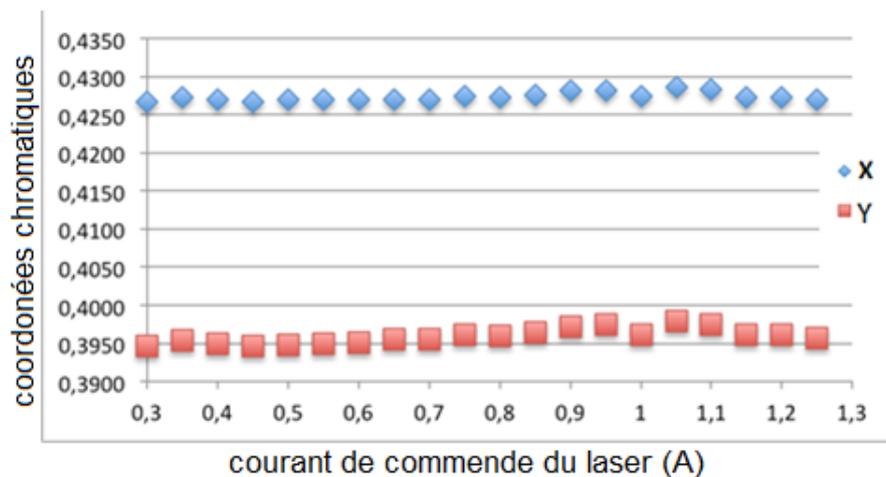


Figure 100 : spectre obtenu pour le couplage de la diode laser avec le luminophore CL-930 d'Intematix en W/(sr/m<sup>2</sup>) par nm.

Ces résultats montrent plusieurs choses. Tout d'abord les résultats obtenus correspondent bien aux valeurs données par le constructeur. Ceci permet de confirmer l'efficacité du banc de mesure ainsi que la possibilité d'adapter efficacement un luminophore à une diode laser. De plus ce luminophore aillant au départ été caractérisé à l'aide d'un réseau de LEDs il semble exister une similitude du comportement lumineux entre un réseau de LEDs et une diode laser. Le défaut principal d'un réseau de LEDs étant l'emballement les variations de coordonnées chromatiques en fonction du courant il convient une fois de plus de mesurer ces dernières dans le cas présent. La figure suivante montre donc la variation des coordonnées x et y en fonction du courant nominal.



**Figure 101 : variation des valeurs de x et y pour le luminophore CL-930 d'Intematix en fonction du courant nominal en Ampère.**

La source obtenue avec le luminophore « Chromalit » semble bien plus stable en courant que les deux précédents. Cette stabilité montre que cette fois-ci le luminophore est bien dimensionné par rapport à la diode laser car celui-ci ne semble pas atteindre son seuil de saturation. Cela confirme aussi la stabilité en courant de la raie laser elle-même. Pour vérifier si ces résultats correspondent aux attentes du cahier des charges du client, il faut se référer à l'ellipse des valeurs acceptable fournie par l'entreprise. Celle-ci est définie et représentée dans la figure suivante.

Color rank	Center	
	x	y
N1	0.3447	0.3553
	Oval parameter	
	a	0.00822
	b	0.00354
	$\theta^\circ$	59.62

Reference (ANSI C78.377)

Color rank	Center		y
	x		
N1	0.3447	0.3553	(5028K)
	a	0.3551	0.3760
	b	0.3376	0.3616
	c	0.3366	0.3369
	d	0.3515	0.3487

\*Color region stay within MacAdam "3-step" ellipse from the chromaticity center.

\*The chromaticity center refers to ANSI C78.377:2008.

Please refer to ANSI C78.377 for the chromaticity center.

\* $\theta$  is the angle between the major axis of the ellipse and the x-axis,

and a and b are the major and minor semi-axes of an ellipse. (Ref. IEC 60081:1997 AnnexD)

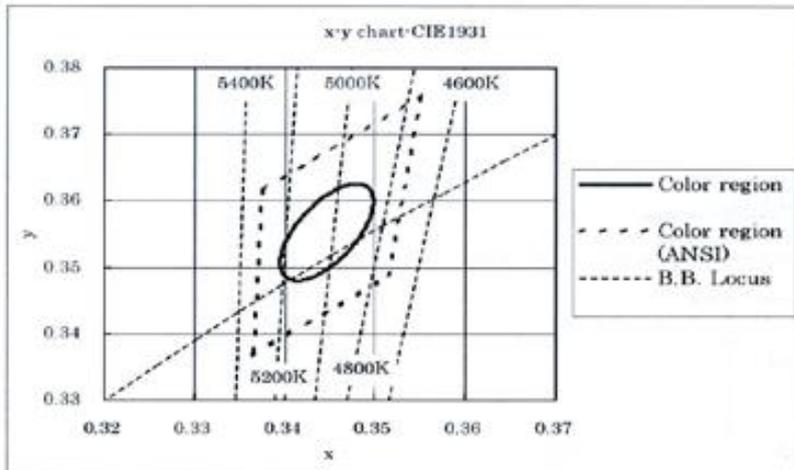


Figure 102 : ellipse de valeurs acceptables définies par le client pour une température de couleur de 5000 K.

La courbe précédente représente les valeurs entre lesquelles doivent se situer, et rester les coordonnées chromatiques de la source lumineuse. Cette courbe est appelée ellipse de Macadam d'échelon 3. Une ellipse de Macadam permet de qualifier la variation chromatique possible autour d'une valeur chromatique cible et de définir à partir de quelle valeur cette variation sera visible par l'œil humain. Ceci s'applique à tous les éclairages, qu'ils soient blancs ou en couleur. Cependant comme l'œil humain décerne plus rapidement une différence dans les nuances de blanc que dans le vert par exemple, les tailles des Ellipses sont différentes en fonction des couleurs comme le montre la figure ci-dessous [123].

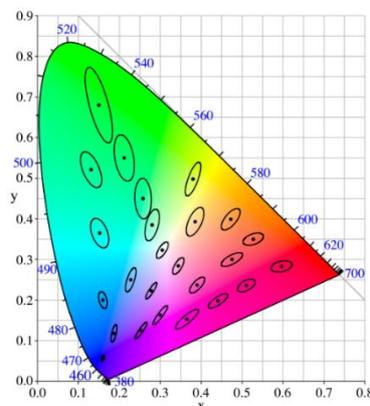
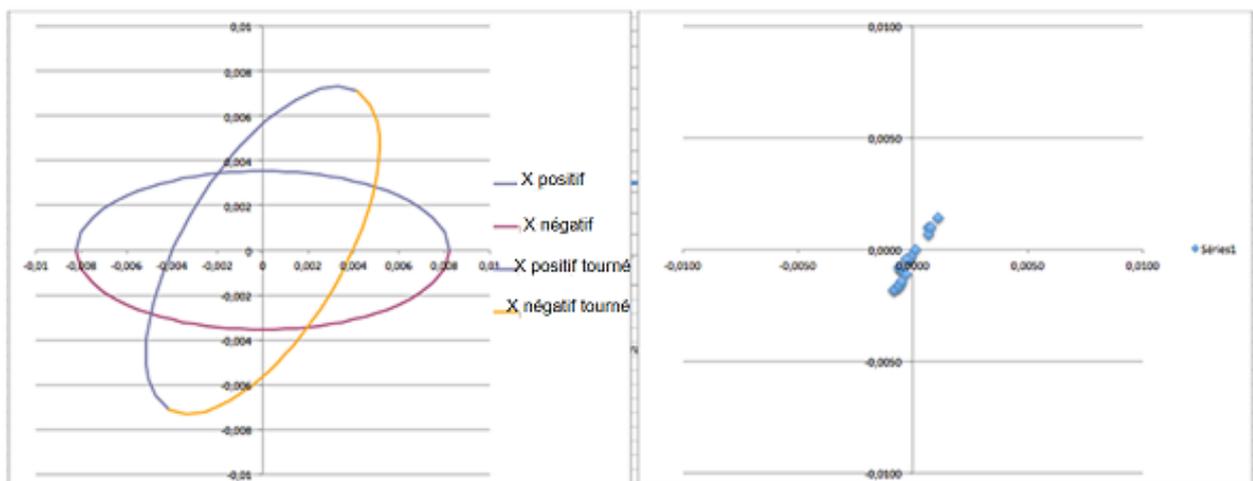


Figure 103 : exemple d'ellipses de Macadam ainsi que la variation de leur taille en fonction de la couleur, chaque ellipse étant grossie d'un facteur 10.

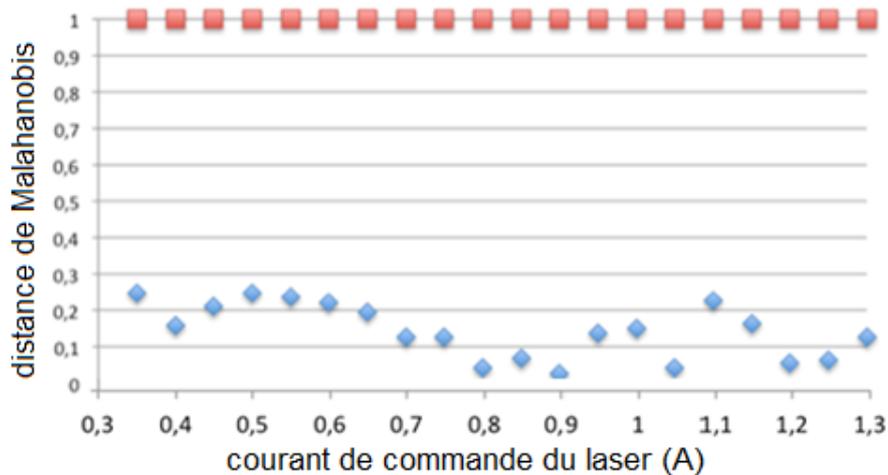
En lumière blanche, au sein de la même ellipse de Macadam des différences de 1 échelon ne sont pas visibles, des différences de 2 à 3 échelons sont à peine discernables et des différences de 4 échelons sont visibles mais considérées comme acceptables. Lors du choix d'une source lumineuse, il est conseillé de privilégier un écart maximum de 4 échelons, dit ellipse de macadam 4, un écart de 3 étant l'idéal.

Le problème étant que la courbe fournie par l'entreprise cliente est adaptée à une température de couleur de 5000K il faut donc prendre l'ellipse correspondante pour 3000K. La figure suivante montre donc l'ellipse de Macadam 3 correspondant à 3000K de température de couleurs ainsi que les coordonnées chromatiques obtenues précédemment. Afin de bien distinguer le degré de stabilité obtenu chacun des résultats est normalisé par rapport au centre de l'ellipse.



**Figure 104 : Coordonnées obtenues dans le domaine XYZ en fonction du courant, pour le luminophore CL-930 d'Intematix, normalisées et comparées à l'ellipse de Macadam correspondante.**

La figure précédente confirme la bonne stabilité chromatique de la source observée. Afin de pouvoir quantifier numériquement le résultat obtenu il est possible d'utiliser la distance de Mahalanobis vis-à-vis de l'ellipse de départ. De cette façon l'ellipse choisie correspondra aux points à distance unitaire du centre. La courbe suivante montre le résultat obtenu pour chaque valeur de courant observée par apport au contour de l'ellipse.



**Figure 105 : distance de Mahalanobis entre les valeurs mesurées pour chaque valeur de courant, en bleu, par rapport au centre de l'ellipse.**

Grace à la figure précédente il est possible d'observer que dans le pire des cas les coordonnées chromatiques ne dévient pas de plus de 30% de la valeur tolérée par l'industrie. La source lumineuse obtenue peut donc être définie comme fortement stable en fonction du courant d'entrée. De plus cette source affiche un indice de rendu des couleurs supérieur à 90 elle correspond donc à ce qui est attendu dans l'industrie actuelle. Finalement le seul défaut de cette source étant sa température de couleur trop basse, elle présente malgré tout le meilleur résultat dans le cas recherché au départ.

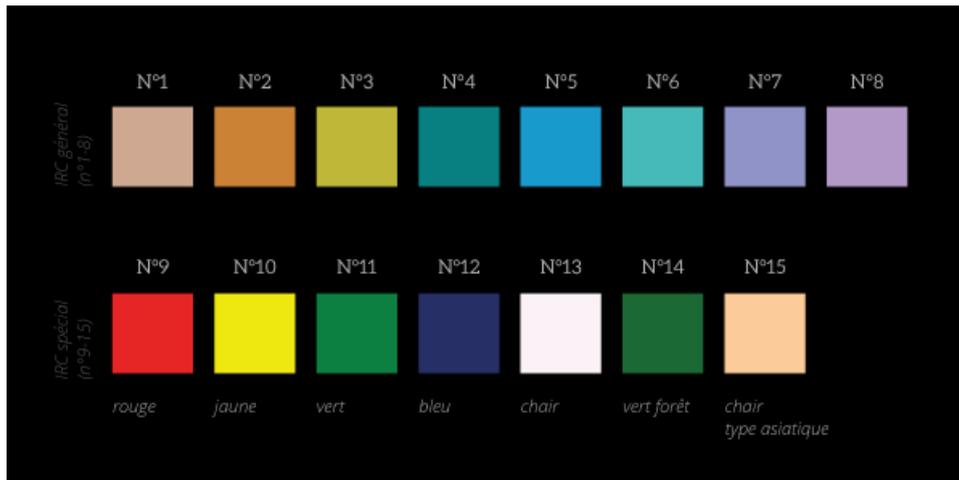
### 4.3.5 Synthèse des résultats.

Au final aucun des luminophores observé n'as permis de répondre entièrement au cahier des charges défini au début. Cependant même si cette application précise n'as pu être réalisée les résultats obtenus sont plus qu'encourageant sur le futur de cette technologie.

Dans un premier temps, pour chaque luminophore la valeur de l'indice de rendu des couleurs s'avérait correct. En effet seul le luminophore de Phosphor Tech donne une source avec un IRC inférieur à 90, les deux autres donnant une valeur supérieure au minimum demandé et le luminophore expérimental atteignant même 93 de valeur d'IRC.

Malgré tout il peut être intéressant de détailler l'indice de rendu des couleurs obtenu afin de savoir si chaque couleur est retranscrite de manière similaire ou si il apparait de forte disparités au niveau de certaine couleurs. En théorie l'absence de certaine raie lumineuse au sein du spectre lumineux devrait se ressentir directement sur les valeurs de rendu de certaines couleurs. Afin de pouvoir réaliser cette analyse il convient de définir les différents composés de l'IRC.

Le logiciel JETI donne en complément de L'IRC, noté Ra, 15 valeurs, notée R1 à R15 pour 15 couleurs test. La figure ci-dessous montre les 15 couleurs de référence pour la mesure de l'IRC.



**Figure 106 : couleurs test utilisé pour caractériser le rendu des couleurs d’une source lumineuse [124].**

Sur ces 15 couleurs seules les 8 premières sont utilisées dans le calcul de l’IRC. En effet ces couleurs présentent une saturation modérées ainsi qu’une clarté similaire. Les 7 couleurs suivantes servent pour des applications spécifiques et ne rentrent donc pas dans le calcul de l’IRC. Dans le cas présent même si seules comptent les 8 premières couleurs dans le calcul final, il peut être intéressant de regarder aussi le rendu obtenu pour les autres sachant que le logiciel le permet. Le tableau ci-dessous montre les valeurs de rendu mesurées pour chaque couleur test pour les 3 luminophores.

IRC Général				IRC spécial			
Ref	CL-930	Grn YAG 10%	5500K-96	Ref	CL-930	Grn YAG 10%	5500K-96
CCT [K]	2923	4413	3974	R9	61,2	94,7	65,9
R1	91,2	96,3	93,3	R10	83,2	89,8	70,9
R2	94,3	97,2	88,3	R11	87,9	90,9	86,9
R3	94,6	92,1	82,0	R12	59,0	49,2	49,5
R4	89,6	92,2	88,8	R13	91,8	98,1	91,6
R5	88,9	91,7	89,9	R14	96,8	95,2	89,2
R6	89,9	89,8	83,2	R15	89,4	94,5	89,6
R7	94,1	95,9	90,5				
R8	83,7	95,5	89,6				
Ra	90,78	93,84	88,20				

**Tableau 7 : indice de rendu des couleurs pour chaque couleur test mesuré pour chaque luminophore avec un courant nominal de 0,8A.**

Le tableau précédent montre que chaque source étudiée présente un indice de rendu des couleurs assez constant pour les 8 premières couleurs observées. En revanche chacune de ces sources présente un indice de rendu du bleu, le R12 nettement inférieur aux autres valeurs mesurées. Ce résultat, similaire à celui observé sur les LEDs est dû à la forte raie bleu résultante du laser qui influence directement le rendu de cette couleur.

Ainsi même si l'IRC obtenu semble convenable il faudra toujours considérer cette faiblesse au niveau du rendu de la couleur bleu surtout dans les cas où elle serait prépondérante.

Dans le cas de la température de couleur de la source, aucune des trois sources étudiées n'ont présenté de valeur satisfaisante. Malgré leur valeur de température de couleur plus proche de la valeur voulue, les deux premiers luminophores s'avéraient ne pas être adaptés à la puissance optique présentée par la diode laser. Le troisième bien que adapté au laser, souffrait d'une température de couleur plus utilisée pour l'éclairage intérieur commun que pour le domaine médical.

Enfin le seuil de saturation des luminophores montra son influence sur les coordonnées chromatiques. Il eut pour conséquence, dans les deux premiers cas, une dérive des coordonnées chromatiques vers le bleu avec la montée en courant de l'alimentation du laser. Cependant la troisième source présentait une grande stabilité chromatique permettant de montrer que, une fois le luminophore correctement dimensionné, la source laser tend à rester stable chromatiquement, quelle que soit la variation du courant nominal. Et cela tant que ce fameux seuil n'est pas atteint.

Le tableau suivant Récapitule les avantages et inconvénients de chaque couplage diode laser / luminophore utilisé lors de ces tests.

Ref	CL-930	YAG 10%	5500K-96
IRC	+	++	-
CCT [K]	--	+	-
Stabilité	++	--	-

**Tableau 8 : avantage et inconvénients de chaque source par rapport aux autres.**

## 4.4 Conclusion.

Au cours de cette étude plusieurs sources lumineuses ont été analysées. Bien que le cahier des charges demandé ne put être rempli cette étude permit de comprendre plusieurs éléments du couplage diode laser / luminophore grâce, principalement, aux trois topologies différentes étudiées ici :

La première topologie utilisait le luminophore Green YAG 10% de Taiwan. Le premier intérêt de cette topologie était de pouvoir réaliser directement le luminophore sans passer par un industriel, et même si le temps passé au sein du laboratoire de la NCU de Taiwan n'était pas suffisant pour réaliser d'autres échantillons, ceux obtenus furent tout de même utiles. Tout d'abord ce luminophore étant une pastille solide, il fut celui ressemblant le plus au modèle de base utilisé au chapitre précédent sur LightTools. De plus en changeant la composition chimique de ce luminophore tout en gardant le même liant pour chacun, il fut possible de vérifier expérimentalement la faisabilité de l'approche par la diffusion de mie étudiée au chapitre 3. Expérimentalement ce luminophore a donné lieu aux meilleures coordonnées chromatiques (x:0,3709, y:0,3586 et CCT: 4431K). De plus il a également donné le meilleur indice de rendu des couleurs (93/94). En revanche il souffrait de la plus grande variabilité en matière de coordonnées chromatiques. De plus la raie laser bleue en sortie était bien trop importante et pouvait affecter la vision des personnes côtoyant cette topologie. La suite de l'étude de cette topologie pourrait s'axer sur le fait de garder la même composition chimique du luminophore mais d'augmenter sa concentration au sein du liant afin d'améliorer la stabilité chromatique et l'indice de rendu des couleurs.

La seconde topologie utilisait le luminophore 5500K-96 de Phosphor Tech. L'intérêt de cette topologie fut d'être la première à venir directement d'un industriel sans avoir été préparée au laser ou encapsulée. En effet celle-ci comprenait un luminophore présenté sous la forme d'une feuille fine et uniforme pouvant être placée sur n'importe quel support. Ce luminophore permis de montrer l'impact de l'épaisseur de ce dernier sur la source lumineuse obtenue, il montra ainsi qu'une épaisseur trop faible pouvait dégrader fortement les caractéristiques attendues normalement pour un luminophore donné. Cette topologie permit de vérifier expérimentalement la faisabilité de l'approche par le changement de l'épaisseur du luminophore faite au chapitre précédent. De plus elle mit aussi en évidence l'impact que peut avoir le laser sur la stabilité thermique du luminophore. En effet ce cas mis en évidence l'importance de bien contrôler la dissipation de chaleur au niveau du luminophore afin de ne pas voir ses caractéristiques se dégrader. Expérimentalement cette topologie fut la plus moyenne des 3. Il présente une température de couleur légèrement plus faible que la précédente (x:0,3722, y:0,3573 et CCT : 4091K), bien que supérieure à celle du dernier cas, tout en étant la seule topologie présentant un indice de rendu des couleurs légèrement inférieur à celui recherché (89). Cependant, une fois le luminophore encapsulé entre deux plaques de quart, elle présente une meilleure stabilité en courant que la topologie précédente.

Dans ce cas-là l'amélioration la plus logique serait d'augmenter l'épaisseur du luminophore voire même de varier celle-ci afin d'avoir une épaisseur supérieure au centre du luminophore afin de pouvoir atténuer le gros de la lumière bleue, cette dernière étant encore trop présente en sortie de la source.

La dernière topologie fut la plus prometteuse des 3. Celle-ci utilisait le nouveau modèle « chromalit » développé par Intematix dans le but d'être utilisé avec des LEDs de puissance. De ce fait le luminophore de cette topologie était, contrairement aux deux autres, réellement adapté à la puissance optique du laser. Ce luminophore, se présentant sous la forme d'une « chandelle » permet de vérifier l'impact de la forme de ce dernier sur la lumière obtenue en sortie de la source. De plus étant plus concentré au centre que sur le pourtour, du fait de sa forme, il put aussi valider expérimentalement le modèle de luminophore cône vu lui aussi au chapitre précédent. Enfin ce luminophore étant adapté à des puissances optiques plus importantes, il n'allait pas saturer lors de l'augmentation du courant dans le laser. Cette topologie donna donc les résultats les plus intéressants en effet c'est celle-ci qui présente les valeurs expérimentales les plus proches des valeurs théorique. De ce fait le seul réel problème rencontré ici fut la température de couleur théorique donnée par le constructeur. En effet au moment des tests les seuls luminophores que le fabricant pu nous fournir avais une température de couleur théorique de 3000K. De ce fait la valeur expérimentale ne s'éloignant que très peu de la théorique il fut obtenue une température de couleur, trop faible, mais logique au vu du luminophore, de 2923K (x: 0,44 et y: 0,4008). L'indice de rendu des couleurs lui par contre s'avère convenable en étant légèrement supérieur à la valeur minimale attendue (91). Là où cette topologie se démarque en revanche c'est au niveau de la stabilité en courant, celle-ci étant, et de loin, supérieure à celle demander dans le cas présent et même généralement dans l'industrie actuelle. L'instabilité mesurée pour ce cas ne dépassant jamais le tiers de celle admise comme correcte dans le domaine de l'éclairage intérieur. Dans ce dernier cas la meilleure amélioration est de prendre un luminophore donné pour 5000K de température de couleur et de le réaliser de la même manière que celui mesuré ici.

Ainsi même si aucune des topologies précédentes ne réponds au cahier des charges médical vu précédemment elles gardent malgré tout un fort potentiel pour l'avenir. La troisième topologie s'offrant même le luxe de correspondre aux standards actuels utilisés dans de nombreux domaines de l'éclairage.

## Conclusion générale.

Bien que encore minoritaires les sources laser se développent de plus en plus dans les systèmes d'éclairages actuels. Elles commencent à apparaître dans l'automobile ainsi que dans le médical. En effet ces sources deviennent une bonne alternative à la technologie LED dès que la puissance optique demandée devient importante. Cette technologie bien qu'imparfaite continue malgré tout à se développer et continuera à l'avenir à se diversifier. Cependant elle reste encore à optimiser tant au niveau de la source lumineuse de départ que de la transformation de la lumière vers la couleur souhaitée. Ainsi le refroidissement de la diode laser prends une part importante de la puissance de la source et le luminophore doit lui aussi s'adapter aux différentes utilisations possibles de cette technologie. La diode LASER bien que encore complexe à mettre en place possède l'avantage de fournir une puissance optique conséquente pour l'utilisation d'une seule diode, là où les LEDs demandent un réseau complexe aillant besoin d'une optimisation importante pour éviter les problèmes inhérents au LEDs tels que l'emballage thermique.

Cependant même si cette technologie est aujourd'hui présente dans l'industrie il reste des problèmes à résoudre et des paramètres à optimiser. Tout d'abord le problème de l'effet de la lumière bleue sur l'organisme reste une problématique tout comme c'est déjà le cas sur les LEDs. D'autant plus que le but des sources laser est de fournir une grande puissance optique et donc de rendre ces effets plus importants. Une solution pourrait être de filtrer cette lumière bleue tout en gardant un rendu des couleurs acceptable. Une autre solution est de n'utiliser ces sources que pour de l'éclairage n'étant pas directement dirigé vers l'œil des utilisateurs comme des plafonniers ou des lampes de blocs opératoires. Une dernière solution pourrait être de d'augmenter la diffusion de la lumière bleue afin d'éviter que celle-ci se retrouve concentrée en un seul point de l'espace éclairé.

Ensuite la caractérisation précise de ces sources devient également une problématique de premier plan. En effet dans le but de correspondre aux demandes actuelles en matière d'éclairage il convient de définir et de connaître au mieux chaque élément de la source étudiée. De plus cette technologie utilise des éléments pas encore optimisés pour elle. De ce fait il convient aussi de savoir quelles modifications doivent être apportées afin d'optimiser l'utilisation de chaque élément de la source. Ainsi la première étude de ce manuscrit c'est concentré sur la diode laser et plus précisément sur ses différences avec les autres sources lumineuses. Cette dernière étant très sensible aux écarts de température, elle nécessite régulièrement un système de refroidissement actif afin de pouvoir la réguler en température. Ce système rajoute des contraintes de consommation et de contrôles à prendre en compte lors de la conception de la source lumineuse.

Les luminophores ont eux aussi posé des contraintes importantes lors de la caractérisation de la source lumineuse. En effet ceux-ci sont également dépendants des deux situations évoquées précédemment. Tout d'abord c'est l'utilisation d'un luminophore qui induit l'obligation d'avoir une forte raie bleue en sortie de la diode laser. De plus celui-ci est le seul élément pouvant impacter la quantité de lumière bleue obtenue en sortie de la source.

Le point positif est que ce même luminophore constitue la meilleure approche pour contrôler cette lumière bleue. De ce fait la suite de ce manuscrit s'est concentré sur la modélisation de la source et la modification du luminophore afin de régler le problème de la lumière bleue.

Le problème principal, justifiant la modélisation, fut que, étant adaptés aux LEDs, les luminophores commerciaux n'étaient pas adaptés au laser. Le plus simple dans un premier temps fut donc de modéliser le couple diode laser/luminophore afin de connaître les paramètres devant être changés sur la composition du luminophore. Cette étude permit d'isoler trois paramètres importants, et modifiables, du luminophore.

En premier lieu sa forme, celle-ci influençant la directivité de la source lumineuse et pouvant aussi servir de filtre à lumière bleue. Pour cela une solution fut de réaliser un modèle de luminophore « cône » où la lumière se verrait plus absorbée au centre de la zone d'éclairage qu'en périphérie. Cette méthode donne d'assez bon résultats et est utilisée actuellement pour les LEDs haute puissance, comme le luminophore Chromalit « candle » d'Intematix.

Ensuite la densité du luminophore, plus précisément sa concentration, peut aussi être contrôlée afin de réduire l'impact de la lumière bleue. En augmentant la concentration de particules actives au sein du luminophore, il devient possible d'atténuer l'impact de la lumière bleue en sortie de la source. De ce fait, cette méthode permet d'obtenir des résultats similaires à la précédente indépendamment de la forme du luminophore. Ce dernier point permet de choisir l'épaisseur du luminophore dans l'unique but de contrôler sa résistance aux températures mises en jeu lors de l'utilisation prolongées de la source. En effet les luminophores actuels, étant prévus pour des LEDs, résistent difficilement à une exposition prolongée au faisceau lumineux d'une diode laser.

Enfin la dernière partie de l'étude de la composition du luminophore se portait sur sa composition chimique. Actuellement la plupart des luminophores jaunes sont essentiellement composés de YAG, or cette technologie est principalement adaptée aux LEDs et beaucoup moins aux diodes laser. Bien évidemment avec l'essor de l'éclairage laser de plus en plus de compositions chimiques adaptées au laser verront le jour. Dans ce but il convient de pouvoir caractériser l'impact d'une nouvelle composition sans avoir à connaître celle-ci. Le but de la dernière modélisation de cette étude fut donc de caractériser l'impact de cette composition par la diffusion de Mie, permettant ainsi de reproduire le comportement d'un luminophore à la composition inconnue. Cette dernière modélisation permettant aussi de donner un objectif à atteindre en créant divers luminophores et en les comparant au modèle utilisé.

La dernière partie de ce manuscrit c'est concentrée sur une approche expérimentale permettant de mettre en pratique les caractéristiques étudiées précédemment. Ainsi cette expérimentation a permis de réaliser une source concrète pouvant répondre aux demandes actuelles en matière d'éclairage. De plus elle a aussi montré les axes d'améliorations de la technologie laser à emprunter afin de pouvoir réellement concurrencer les technologies actuelles dans d'autres domaines que ceux étudiés ici.

## Références :

- [1] AFE, (2014). Éclairage public les chiffres clés.  
[http://www.afe-eclairage.fr/docs/2014/12/09/12-09-14-11-22-Les\\_chiffres\\_cles\\_eclairage\\_public.pdf](http://www.afe-eclairage.fr/docs/2014/12/09/12-09-14-11-22-Les_chiffres_cles_eclairage_public.pdf)
- [2] AFE, (2015). Éclairage public les chiffres clés.  
<http://eclairagepublic.eu/site/eclairage-public-les-chiffres-cles/>
- [3] GCDD, (2014). Éclairage public : un gisement d'économies d'énergie.  
<http://www.ademe.fr/collectivites-secteur-public/patrimoine-communes-comment-passer-a-l'action/eclairage-public-gisement-deconomies-denergie>
- [4] Huygens, C. and Thompson, S. P. (trans), (2005). 'Treatise on Light', University of Chicago Press.
- [5] Zareni, rayonnements par longueur d'onde.  
[http://www.pion.cz/\\_sites/pion/upload/images/50a376d3f13453867259b275cdbcadbf88\\_11-zareni-graf-wiki-fr.png](http://www.pion.cz/_sites/pion/upload/images/50a376d3f13453867259b275cdbcadbf88_11-zareni-graf-wiki-fr.png)
- [6] Ultra-violet, visible, infra-rouge : Les lampes, sources de rayonnement, et leurs applications pratiques, M. La Toison. (1955).
- [7] [http://www.web-sciences.com/documents/terminale/tedo18/teco18x\\_fichiers/image010.png](http://www.web-sciences.com/documents/terminale/tedo18/teco18x_fichiers/image010.png)
- [8] "The Body Clock Guide to Better Health" by Michael Smolensky and Lynne Lamberg; Henry Holt and Company, Publishers (2000).
- [9] Vitaterna, MS; Takahashi, JS; Turek, FW (2001). "Overview of circadian rhythms".
- [10] Shneerson, J.M.; Ohayon, M.M.; Carskadon, M.A. (2007). "Circadian rhythms"
- [11] <http://www.douglas.qc.ca/info/rythmes-circadiens-effet-de-la-lumiere>
- [12] <https://canal.ugr.es/sciences-sociales-economiques-et-juridiques/item/80296-une-étude-démontre-que-les-piétons-se-sentent-plus-sûrs-dans-les-rues-éclairées-avec-de-la-lumièreblanche?tmpl=component&print=1>
- [13] [http://www.afe-eclairage.fr/docs/2014/12/09/12-09-14-11-11-eclairage\\_public\\_et\\_insecurite\\_securite.pdf](http://www.afe-eclairage.fr/docs/2014/12/09/12-09-14-11-11-eclairage_public_et_insecurite_securite.pdf)
- [14] <http://www.crdp-montpellier.fr/themadoc/Architecture/reperes2.htm>
- [15] <http://www.gif-lumiere.com/lumiere/architecture.php>
- [16] [http://www.abr-bwv.be/sites/default/files/6\\_4%20collard%20F.pdf](http://www.abr-bwv.be/sites/default/files/6_4%20collard%20F.pdf)
- [17] <http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=14842>
- [18] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=17233>
- [19] <https://www.zenlatitudes.com/FR/article-lumiere-bleue.htm>
- [20] <http://www.sciencesetavenir.fr/sante/20100111.OBS3325/migraine-quand-la-lumiere-fait-mal.html>
- [21] <http://www.slate.fr/story/15799/pourquoi-la-lumiere-fait-si-mal-aux-migraineux>
- [22] [http://perso.calixo.net/~jmg/TPE\\_2/oeil1\\_fichiers/image002.jpg](http://perso.calixo.net/~jmg/TPE_2/oeil1_fichiers/image002.jpg)
- [23] <http://svtmarcq.e-monsite.com/medias/images/retine1.png>
- [24] [http://www.med.univ-montp1.fr/enseignement/cycle\\_1/PCEM2/mod-integres/MI3\\_neuro/sensorialite/vision/cours/images-vision/f\\_dist\\_cone\\_batonnet2.gif](http://www.med.univ-montp1.fr/enseignement/cycle_1/PCEM2/mod-integres/MI3_neuro/sensorialite/vision/cours/images-vision/f_dist_cone_batonnet2.gif)
- [25] <https://books.google.fr/books?isbn=2743019115>
- [26] [http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a\\_02/a\\_02\\_m/a\\_02\\_m\\_vis/a\\_02\\_m\\_vis.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_m/a_02_m_vis/a_02_m_vis.html)
- [27] <http://www.picbleu.fr/uploads/documents/56dfd6eec7902.jpeg>
- [28] <http://www.energie-environnement.ch/maison/eclairage-et-piles/1369>
- [29] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Efficacit%C3%A9\\_lumineuse\\_relative\\_specrale\\_k.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Efficacit%C3%A9_lumineuse_relative_specrale_k.jpg)

- [30] <http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/DOWNLOADS>.
- [31] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/CIExy1931.png>.
- [32] <http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/index.htm>.
- [33] [http://www.afhalifax.ca/magazine/wp-content/sciences/Planck/Le%20corps%20noir\\_files/rayonnement\\_corps\\_noir.png](http://www.afhalifax.ca/magazine/wp-content/sciences/Planck/Le%20corps%20noir_files/rayonnement_corps_noir.png).
- [34] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006807/document>.
- [35] <http://lumenhub.com/wp-content/uploads/2015/07/nominal-CCT.jpg>.
- [36] Luo, Q-Z; D'Angelo, N; Merlino, R. L. (1998). "Shock formation in a negative ion plasma"
- [37] Sturrock, Peter A. (1994). Plasma Physics: An Introduction to the Theory of Astrophysical,, Geophysical & Laboratory Plasmas. Cambridge University Press.
- [38] "Ionization and Plasmas". The University of Tennessee, Knoxville Department of Physics and Astronomy.
- [39] <http://phozagora.free.fr/?surfpage=Historique>.
- [40] Éclairage d'intérieur et ambiances visuelles, J.J. DAMELIN COURT, G. ZISSIS, C. CORBE, B. PAULE
- [41] [http://www.smartcandle.fr/309-large\\_default/chandelle-silicone-27cm-blanche-led-blanc-soft.jpg](http://www.smartcandle.fr/309-large_default/chandelle-silicone-27cm-blanche-led-blanc-soft.jpg)
- [42] <http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/images/qc/lampe-a-incandescence-114650.jpg>
- [43] <http://tpe-physique-cuisine.pagesperso-orange.fr/images-utilisees/ampoule-halogene.jpg>
- [44] [http://www.linternaute.com/science/technologie/comment/06/lampe-halogene/lampe\\_halogene.gif](http://www.linternaute.com/science/technologie/comment/06/lampe-halogene/lampe_halogene.gif)
- [45] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9b/Fluo-phospho.jpg/330px-Fluo-phospho.jpg>
- [46] [http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04\\_technique/03\\_eclairage/images/tube\\_fluorescent\\_circuit.png](http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/03_eclairage/images/tube_fluorescent_circuit.png)
- [47] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe\\_fluorescente#/media/File:02\\_Spiral\\_CFL\\_Bulb\\_2010-03-08\\_\(black\\_back\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_fluorescente#/media/File:02_Spiral_CFL_Bulb_2010-03-08_(black_back).jpg)
- [48] <http://www.ilocis.org/fr/documents/images/046-005f.gif>
- [49] [http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04\\_technique/03\\_eclairage/images/lampe\\_mercure\\_haute\\_pression.png](http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/03_eclairage/images/lampe_mercure_haute_pression.png)
- [50] [http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04\\_technique/03\\_eclairage/images/lampe\\_induction.png](http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/03_eclairage/images/lampe_induction.png)
- [51] [http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page\\_id=3893](http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page_id=3893)
- [52] <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=16162.php>
- [53] [http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page\\_id=3898](http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page_id=3898) Round, H. J. (1907), "A note on carborundum", Electrical World, 49: 309. Round's letter is dated 9 February 1907
- [54] [http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20061221/125713/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20061221/125713/)
- [55] <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>
- [56] Physics of Semiconductor Devices, S.M. Sze, Kwok K. 10 April 2006. Ng Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.
- [57] Solid State Physics, Neil W. Ashcroft, N. Mermin. 1976. Brooks/Cole.
- [58] Fundamentals of semiconductors: Physics and materials properties, P.Y. Yu, Manuel Cardona. 2010. Springer.
- [59] <http://cellule-photovoltaïque.e-monsite.com/medias/images/bande-interdite-valence-et-conduction-copie.jpg>
- [60] Étude du dopage de matériaux covalents cages nanostructurés, Florent Tournus 2003. Université Claude Bernard Lyon 1.

- [61] Dopage par modulation d'hétérostructures de semiconducteurs II-VI semimagnétiques en épitaxie par jets moléculaires, Alexandre Arnoult. 1998. HAL Id: tel-00002701 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00002701>.
- [62] [http://lms.epfl.ch/files/content/sites/lms2/files/lectures/solid/cours/Chapitre\\_7.pdf](http://lms.epfl.ch/files/content/sites/lms2/files/lectures/solid/cours/Chapitre_7.pdf)
- [63] [https://www.researchgate.net/figure/Transition-electronique-dans-le-cas-dun-semiconducteur-a-a-gap-indirect-et-b-a-gap\\_fig2\\_312579225](https://www.researchgate.net/figure/Transition-electronique-dans-le-cas-dun-semiconducteur-a-a-gap-indirect-et-b-a-gap_fig2_312579225)
- [64] [http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode\\_8.html](http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html)
- [65] Graphène épitaxié sur SiC : dopage et fonctionnalisation, Emilio Velez <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127576/document>
- [66] H.P. Maruska & J.J. Tietjen, Appl. Phys. Lett. 15, 327 (1969)
- [67] J.I Pankove, J. Lumin.7, 114 (1973)
- [68] A. Y. Cho & J. R. Arthur, Prog. Solid State Chem. 10, 157 (1975).
- [69] H.M. Manasevit, F.M. Erdman & W. I. Simpson, J. Electrochem. Soc. 118, 1864 (1971).
- [70] S. Yoshida, S. Misawa & S. Gonda, Appl. Phys. Lett. 42, 427 (1983).
- [71] H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda & Y. Ishii, J. Lumin.40 &41, 121 (1988).
- [72] <http://www.led-development.fr/Technologie-LED>
- [73] <http://luxreview.com/article/2016/02/led-inventor-bets-on-lasers-to-replace-leds>
- [74] <http://bitesizebio.com/19629/fluorescence-101-a-beginners-guide-to-excitationemission-stokes-shift-jablonski-and-more/>
- [75] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838804010710>
- [76] <http://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6294800.pdf>
- [77] <http://www.ledsmagazine.com/articles/2011/11/lasers-could-offer-alternative-to-led-light-sources.html>
- [78] <https://www.matierevolution.fr/spip.php?article4339> L'expérience des fentes de Young et la dualité onde/corpuscule
- [79] <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/histoire-laser-Cagnac.xml>
- [80] <http://gabriel.elbaz.free.fr/partie1-lumiere.html>
- [81] Pré-histoire et histoire du LASER, conférence de Bernard Cagnac, Physique au printemps 2010.
- [82] ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA LUMIÈRE ÉMISE PAR UN LASER A RUBIS, M. PAUTHIER, R. GAUTIER, S. DEINNESS, et G. AMAT. <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00236588/document>.
- [83] Conception et caractérisation d'un laser accordable à verre CO-dopé à l'erbium et à l'ytterbium, Marie-Josée Picard. Thèse (M. Sc.)--Université Laval, 2000. Comprend des réf. bibliogr.
- [84] [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M01\\_C01/co/Contenu\\_11.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Contenu_11.html) conditions sur la cavité laser.
- [85] [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M01\\_C03/co/Contenu\\_02.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C03/co/Contenu_02.html) Modes spectraux et modes longitudinaux.
- [86] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/diodes-laser-principe-et-technologie>
- [87] [http://www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-13/201106\\_ecole\\_detecteurs\\_laser\\_3.pdf](http://www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-13/201106_ecole_detecteurs_laser_3.pdf)
- [88] G. Blasse and B.C. Grabmaier. Luminescent Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- [89] A.J.J. Bos. Theory of thermoluminescence. Radiation Measurements, 41, Supplement 1:S45 – S56, 2006.
- [90] J. Valenta I. Pelant. Luminescence Spectroscopy of Semiconductors. OUP Oxford, 2012.
- [91] F. Williams and G. E. Rindone et al. Luminescence of Inorganic Solids. Academic Press, 1966.
- [92] T.P Seward. Proceedings of the fifth university conference on glass science coloration and optical anisotropy in silver-containing glasses. Journal of Non-Crystalline Solids, 40(1):499 – 513, 1980.

- [93] D.I. Chepic, Al.L. Efros, A.I. Ekimov, M.G. Ivanov, V.A. Kharchenko, I.A. Kudriavtsev, and T.V. Yazeva. Auger ionization of semiconductor quantum drops in a glass matrix. *Journal of Luminescence*, 47(3):113 – 127, 1990.
- [94] J. F. Perrin. <http://www.perrin33.com/biochanalys/photons/phosphorescence.html>, 2007.
- [95] M. Sauer, J. Hofkens, and J. Enderlein. *Handbook of Fluorescence Spectroscopy and Imaging: From Ensemble to Single Molecules*. Number chap1 in p1-30. Wiley, 2010.
- [96] N. J. Turro, V. Ramamurthy, and J. Scaiano. *Modern Molecular Photochemistry of Organic Molecules*. *ChemPhysChem* 12(13):2496-2497 · September 2011.
- [97] T. V. Gavrilovic, D. J. Jovanovic, V. Lojpur, and M. D. Dramicanin. Multifunctional Eu<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-doped GdVO<sub>4</sub> nanoparticles synthesized by reverse micelle method. *Scientific Reports*, 4(Article n°: 4209), 2014.
- [98] E.Orhan et al. Towards an insight on the photoluminescence of disordered CaWO<sub>4</sub> from a joint experimental and theoretical analysis. *Journal of Solid State Chemistry*, 178(4):1284 – 1291, 2005.
- [99] L.S. Cavalcante, J.C. Sczancoski, J.W.M. Espinosa, V.R. Mastelaro, A. Michalowicz, P.S. Pizani, F.S.De Vicente, M.S. Li, J.A. Varela, and E. Longo. Intense blue and green photoluminescence emissions at room temperature in barium zirconate powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 471(1-2):253–258, 2009.
- [100] A.E. Souza, R.A. Silva, G.T.A. Santos, M.L. Moreira, D.P. Volanti, S.R. Teixeira, and E. Longo. Photoluminescence of barium-calcium titanates obtained by the microwave-assisted hydrothermal method (MAH). *Chemical Physics Letters*, 488(1-3):54 – 56, 2010.
- [101] J. Li, K. Qiu, J. Li, W. Li, Q. Yang, and J. Li. A novel broadband emission phosphor Ca<sub>2</sub>KMg<sub>2</sub>V<sub>3</sub>O<sub>12</sub> for white light emitting diodes. *Materials Research Bulletin*, 45(5):598 – 602, 2010.
- [102] C. K. Lin and Y. Luo, H. You, Z. Quan, J. Zhang and J. Fang, and J. Lin. Sol gel derived BPO<sub>4</sub>- Ba<sup>2+</sup> as a new efficient and environmentally friendly bluish white luminescent material. *Chemistry of Materials*, 18(2):458–464, 2006.
- [103] C. Zhang, C. Lin, C. Li, Z. Quan, X. Liu, and J. Lin. Enhanced luminescence of BPO<sub>4</sub> by mixing with SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(6):2183–2192, 2008.
- [104] W.H. Green, K. P. Le, J. Grey, T. T. Au, and M. J. Sailor. White phosphors from a silicatecarboxylate sol-gel precursor that lack metal activator ions. *Science*, 20:1826–1828, 1997.
- [105] C. Zhang and J. Lin. Defect-related luminescent materials: synthesis, emission properties and applications. *Chem Soc Rev*, 41:7938–7961, 2012.
- [106] L. A. Balagurov, B. M. Leiferov, E. A. Petrova, A. F. Orlov, and E. M. Panasenko. Influence of water and alcohols on photoluminescence of porous silicon. *Journal of Applied Physics*, 79(9):7143–7147, 1996.
- [107] H. Nishikawa, E. Watanabe, D. Ito, Y. Sakurai, K. Nagasawa, and Y. Ohki. Visible photoluminescence from Si clusters in gama-irradiated amorphous SiO<sub>2</sub>. *J. Appl. Phys.*, 80(6):3513–3517, 1996.
- [108] A. Quaranta, S. Carturan, A. Campagnaro, M. Dalla Palma, M. Giarola, N. Daldosso, G. Maggioni, and G. Mariotto. Highly fluorescent xerogels with entrapped carbon dots for organic scintillators. *Thin Solid Films*, 553:188 – 192, 2014.
- [109] T. Hayakawa, A. Hiramitsu, and M. Nogami. White light emission from radical carbonylterminations in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- SiO<sub>2</sub> porous glasses with high luminescence quantum efficiencies. *Applied Physics Letters*, 82(18):2975, may 2003.

- [110] F. F. Komarov, A. V. Mudryi, L. A. Vlasukova, N. I. Mukhurov, and A. V. Ivanyukovich. Intense blue luminescence of anodic aluminum oxide. *Optics and Spectroscopy*, 104(2):235–237, 2011.
- [111] P. S. Pizani, E. R. Leite, F. M. Pontes, E. C. Paris, J. H. Rangel, E. J. H. Lee, E. Longo, P. Delega, and J. A. Varela. Photoluminescence of disordered ABO<sub>3</sub> perovskites. *Appl. Phys. Lett.*, 77:824, 2000.
- [112] L.S. Cavalcante, J.C. Sczancoski, F. S. De Vicente, M.T. Frabro, M S. Li, J. A. Varela and E. Longo. Microstructure, dielectric properties and optical band gap control on the photoluminescence behavior of Ba[Zr<sub>0.25</sub>Ti<sub>0.75</sub>]O<sub>3</sub> thin films. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 49(1):35–46, 2009.
- [113] Optical skin-fat measurement using miniaturized chip LEDs: a preliminary human study, D. S. Ho, E. H. Kim, I. D. Hwang, K. Shin, J. T. Oh, and B. M. Kim, *J. Opt. Soc. Korea* 13, 304-309 (2009).
- [114] Solid State Lighting with Blue Laser Diodes, R. Gatdula, J. Murray, A. Heizler, M. Shah, Senior Capstone Project : Circuit and Microelectronic Systems, page 5.
- [115] G. Chen, M. Craven, A. Kim, A. Munkholm, S. Watanabe, M. Camras, W. Gotz, and F. Steranka, *Phys. Status Solidi A* 205, 1086-1092 (2008), “Performance of high-power III-nitride light emitting diodes”.
- [116] <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/rayonnement/3-rayonnement-atmosphere/3-3-diffusion-rayleigh.html>.
- [117] [http://sesp.esep.pro/fr/pages\\_flux-et-spectre/ray-mie.html](http://sesp.esep.pro/fr/pages_flux-et-spectre/ray-mie.html).
- [118] Etude et optimisation des propriétés optiques et morphologiques d’un luminophore du type La<sub>1-x-y</sub>Ce<sub>x</sub>Tb<sub>y</sub>PO<sub>4</sub>, Michel Junker.
- [119] [http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/exo\\_EffetPeltier.html](http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/exo_EffetPeltier.html)
- [120] Optical skin-fat measurement using miniaturized chip LEDs: a preliminary human study, D. S. Ho, E. H. Kim, I. D. Hwang, K. Shin, J. T. Oh, and B. M. Kim, *J. Opt. Soc. Korea* 13, 304-309 (2009).
- [121] <https://medical.lid-lamps.com/blog/lindice-de-rendu-des-couleurs-et-la-temperature-de-couleur/>
- [122] <https://hospital-solutions.maquet.com/siteassets/reference-projects/>
- [123] <https://www.spx-lighting.com/uploads/tools/ellipse-de-macadam.pdf>
- [124] <http://leclairage.fr/knowledge-base/irc/>



# Valorisation des travaux de thèse

Conférences avec actes :

LS14, Come du 22 au 27 Juin 2014

Création de lumière blanche par le couplage d'une diode laser et d'un luminophore adapté  
Présentation poster

LS15, Kyoto du 22 au 27 mai 2016

White light modelisation using laser diode and remote phosphor  
Présentation poster

JCGE 2017, Arras du 30 mai au 1er juin 2017

Création de lumière blanche par le couplage d'une diode laser et d'un luminophore adapté  
Présentation poster

Articles :

AIP Advances 4, 107134 (2014) <https://doi.org/10.1063/1.4899187>

Efficiency and stability of a phosphor-conversion white light source using a blue laser diode  
Article

JLVE Volume 41 217-221, (2018) <https://doi.org/10.2150/jstl.IEIJ160000596>

White light modeling using laser diode and remote phosphor  
Research note

3EI 2017-89 35, (2017)

Création de lumière blanche par le couplage d'une diode laser et d'un luminophore adapté  
Article



# Annexes :

## 1. Les origines du laser : l'expérience des fentes de Young

Le laser trouve ses origines dans les années 1800 avec le changement du concept de la lumière : en effet dès 1801, Thomas Young remet en question l'approche corpusculaire de la lumière grâce à l'expérience dite des fentes de Young. Cette expérience est un des fondements de la remise en cause de la physique classique et de l'émergence de la physique quantique.

Dans la physique classique, la matière était définie comme corpusculaire et la lumière comme ondulatoire. L'expérience des fentes de Young démontre que les deux adoptent un comportement pouvant être tantôt corpusculaire tantôt ondulatoire. Pour cette expérience une source de lumière ponctuelle est utilisée pour éclairer deux fentes étroites percées dans un écran opaque et les images de ces fentes sont projetées sur un second écran tel que montré sur la figure 107 [78].

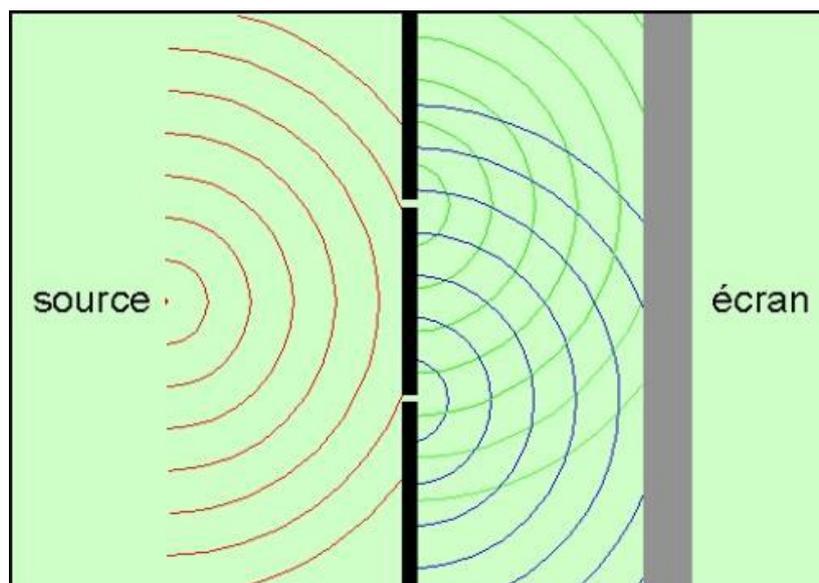


Figure 107 : expérience des fentes de Young.

Le résultat attendu en considérant la physique classique serait deux bandes de lumière partiellement superposées, mais en réalité il apparaît une alternance régulière de bandes claires et sombres. Ce résultat est dû au fait que lorsque les ondes lumineuses arrivent en phase sur l'écran elles se renforcent et créent une région brillante alors que si elles arrivent déphasées, elles se compensent et créent une région sombre. Ce comportement est celui d'une onde et non d'un ensemble de particules. Cependant en diminuant l'intensité de la source lumineuse et en remplaçant l'écran par une plaque photographique il est possible d'observer le comportement d'un photon à la fois.

Ainsi chaque photon arrivant sur la plaque produit une tache lui étant propre, prouvant ainsi, qu'à l'arrivée sur la plaque le photon se comporte bien comme une particule avec un point d'arrivée précis. Mais si plusieurs photons successifs sont observés alors la figure d'interférence se construit graduellement, point par point et bien que les photons arrivent individuellement le comportement global de ceux-ci fait apparaître une figure d'interférence ondulatoire. Ainsi c'est cette différence entre la détection de la lumière comme un ensemble de particules et sa distribution dans l'espace ayant un caractère ondulatoire, donnant naissance au concept de la dualité onde/corpuscule, qui sera à l'origine du Maser puis du Laser.

## 2. De la théorie ondulatoire aux premiers MASER.

Suivant cette découverte la théorie ondulatoire de la lumière va être appuyée par les travaux d'Augustin Fresnel et François Arago. En juillet 1849, Hippolyte Fizeau réalise une mesure de la vitesse de la lumière dans l'air en utilisant une roue dentée tournant à vitesse constante. Il trouvera un résultat proche de 315 300 km/s. En 1864 James Clerk Maxwell publie sa théorie sur l'électromagnétisme et démontre que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace à une vitesse de 310 740 km/s [79].

Le caractère ondulatoire de la lumière semble admis dès 1900 lorsque Max Planck cherche à expliquer les phénomènes d'incandescence. Il montrera que l'énergie lumineuse ne s'échange pas de façon continue mais par paquet irréductibles d'énergie qu'il nommera quantas d'énergie. Ainsi la formule de l'énergie est la suivante :

$$5.1 \quad E=hf$$

Où  $f$  correspond à la fréquence du rayonnement et  $h$  à la constante de Planck, donc le fameux quanta, défini par :

$$5.2 \quad h=6,62 \times 10^{-34}$$

Cette formule sera démontrée par Albert Einstein en 1905. Max Planck recevra ainsi le prix Nobel de physique en 1918 pour ses travaux sur la théorie des quantas et Albert Einstein recevra le même prix en 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique.

L'année d'après en 1922 Niels Bohr reçoit lui aussi un prix Nobel pour son apport à la création de la théorie quantique en particulier sur les niveaux d'énergie atomiques. Il présente une théorie selon laquelle l'atome serait un noyau autour duquel graviteraient les électrons.

Dans cette représentation, dite planétaire, plus un électron est éloigné du noyau, plus son énergie sera importante et lorsque un électron passe d'un niveau d'énergie à un autre il peut émettre un quantum d'énergie appelé : photon.

Sur la figure 108 suivante sont représentés deux niveaux d'énergie d'un atome. En apportant suffisamment d'énergie à cet atome il est possible de faire « sauter » les électrons vers les couches périphériques. La quantité d'énergie nécessaire à ce résultat augmentant avec l'éloignement par rapport au noyau.

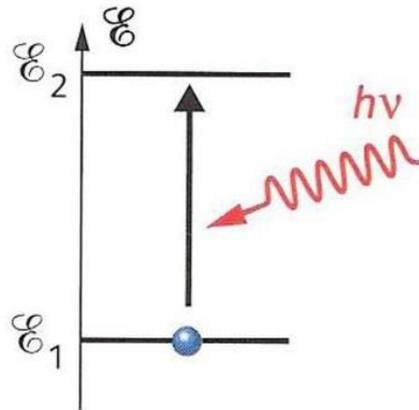


Figure 108 : représentation de deux niveaux d'énergie d'un atome.

Chaque niveau se caractérise par son énergie, sa population et sa durée de vie, définie par le temps caractéristique de dépeuplement de ce niveau. Lorsqu'un atome est excité par un apport d'énergie suffisant, les électrons passent sur des niveaux d'énergie supérieurs. La durée de vie étant très faibles sur ces niveaux, ils retournent spontanément sur les niveaux inférieurs en émettant au passage un photon de fréquence  $\nu$  définie par :

$$5.3 \quad E_2 - E_1 = h\nu$$

Avec  $E_2$ , l'énergie du niveau supérieur,  $E_1$ , l'énergie du niveau inférieur et  $h$  la constante de Planck.

En 1913 seuls deux processus d'interaction entre les atomes et le rayonnement sont connus : L'absorption et l'émission spontanée. Dans le cas de l'absorption l'atome passe de son état fondamental d'énergie  $E_1$  à l'état excité  $E_2$  en absorbant un photon. La perte de ce photon atténue l'onde incidente. En revanche dans le cas de l'émission spontanée l'atome, excité initialement, repasse à son état fondamental. Le passage d'un niveau d'énergie  $E_2$  à un niveau  $E_1$  plus faible produit l'émission d'un photon. Ce photon est émis dans une direction aléatoire au bout d'une durée elle aussi aléatoire. La probabilité ou taux d'émission spontanée par atome et par unité de temps, notée  $A_{2 \rightarrow 1}$ , est nommée coefficient d'Einstein [80]. Les figures 109 et 110 ci-dessous montrent ces deux interactions entre atome et rayonnement.

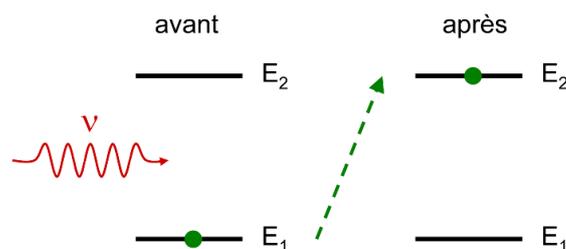


Figure 109 : interaction par absorption.

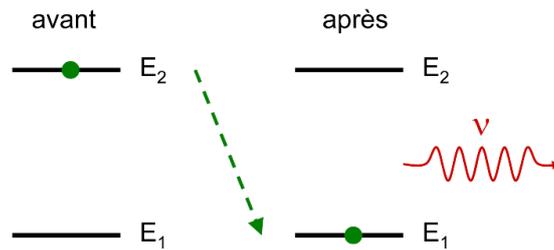


Figure 110 : interaction par émission spontanée.

En 1917, Albert Einstein publie un article sur un troisième processus d'interaction entre l'atome et le rayonnement : L'émission stimulée. Celle-ci peut se voir comme l'inverse de l'absorption, se produisant, comme l'absorption, en présence de rayonnement incident résonnant avec la fréquence de transition des atomes. Comme montré en figure 111, un photon d'énergie  $h\nu$  induit la désexcitation d'un atome vers un niveau d'énergie plus faible. Celle-ci produit un photon inducteur de même fréquence  $\nu$ , même direction de propagation et même état de polarisation. Le faisceau de lumière incident s'enrichit en photons identiques créant ainsi une amplification de la lumière. En effet le photon ainsi créé présente toutes les caractéristiques du photon incident : fréquence, phase, direction de propagation et état de polarisation.

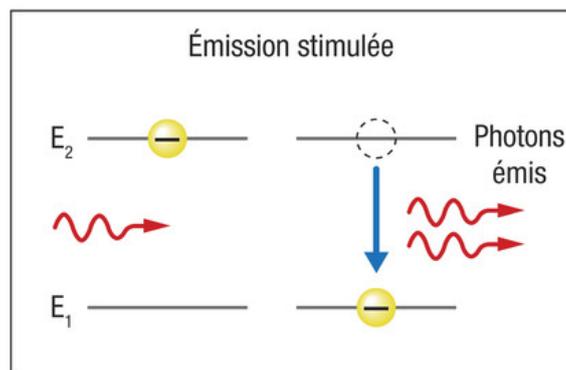


Figure 111 : interaction par émission stimulée.

Cependant afin que le processus d'absorption ne prenne pas le dessus sur le processus d'émission il est nécessaire d'avoir plus d'atome dans l'état excité que dans l'état fondamental. Or la matière se trouvant majoritairement dans l'état fondamental il a fallu développer une méthode pour renverser la tendance thermique pour obtenir, dans le milieu voulu, une inversion de population. Cela semblait impossible à mettre en œuvre car le coefficient de probabilité de retombée spontanée des atomes  $A_{2 \rightarrow 1}$  est grand : de  $10^6$  à  $10^9$  par seconde. De plus Einstein montra que cette probabilité de retombée était proportionnelle au cube de la fréquence.

Ce fut seulement en 1954, presque 40 ans plus tard, que Charles H. Townes utilisa l'idée d'Einstein pour construire un appareil utilisant l'émission stimulée. Charles H. Townes travaillait alors sur la microscopie micro-onde des molécules à l'aide d'oscillateurs électroniques. Il remarqua qu'en passant de la lumière, c'est-à-dire des fréquences de l'ordre de  $10^6$  GHz, aux micro-ondes, de l'ordre du GHz, la probabilité de retombée spontanée des atomes se voyait divisée par un  $10^6$  au cube. Il utilisa des molécules d'ammoniac pour réaliser une transition entre deux états  $E_2$  et  $E_1$  tels qu' $E_2 - E_1 \approx 1 \mu\text{V}$ . Le rapport entre les occupations des niveaux  $E_2$  et  $E_1$  est donné par la loi de Boltzmann suivante :

$$5.4 \quad N_2/N_1 = \exp[-(E_2 - E_1)/kT]$$

Où  $N_2$  et  $N_1$  sont le nombre respectif d'atomes dans l'état énergétique  $E_2$  et  $E_1$   $T$  est la température en Kelvin et  $k$  la constante de Boltzmann donnée :

$$5.5 \quad K = 8,61 \times 10^{-3} \text{ eV/K}$$

Pour une température ambiante de  $T = 300 \text{ K}$ ,  $N_2/N_1$  donne une valeur de  $\approx 0,98$ . Il y a donc dans ce cas-là environ autant de molécules dans l'état  $E_2$  que dans l'état  $E_1$ . L'astuce de cet appareil était dans le fait que les atomes dans les niveaux d'énergie  $E_2$  et  $E_1$  n'ont pas le même moment dipolaire électrique [81]. En créant un gradient de champ électrique Charles Townes a obtenu que les atomes situés dans ces deux niveaux d'énergie ne soient pas déviés de la même façon comme le montre la figure 112 ci-dessous. Il a choisi de dévier les atomes qui se trouvent dans le niveau d'énergie  $E_1$  contre une paroi refroidie à l'azote liquide, pour les solidifier. Les atomes situés dans l'autre état étaient eux dirigés vers un orifice pour tomber dans un guide d'onde, dans lequel se trouvait l'onde incidente. Ensuite l'onde radar émise ressortait amplifiée. Charles Townes nommera cette technologie : Microwave Amplifiery by Stimulated Emission of Radiation créant ainsi l'acronyme MASER.

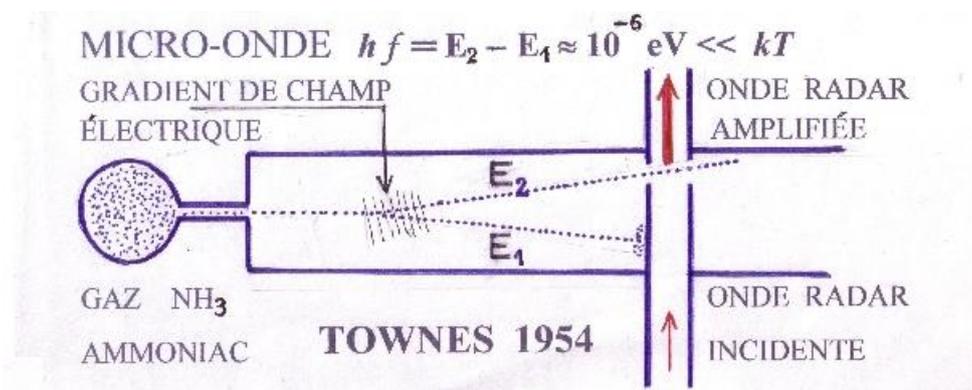


Figure 112 : Principe de fonctionnement du premier MASER à ammoniac.

En partant de ces résultats, Charles Townes a ensuite travaillé sur la méthode pour transposer sa technologie utilisant les micro-ondes vers des fréquences plus élevées. En 1958 il publie, avec son nouveau collaborateur Arthur Schawlow, un article présentant une nouvelle idée pour réaliser une inversion de population : le pompage optique. En effet il avait bénéficié, en 1955, d'une année sabbatique au cours de laquelle il avait passé plusieurs mois dans un laboratoire de l'ENS de la rue d'Ulm à Paris en compagnie d'Albert Kastler. C'est dans ce laboratoire que Albert Kastler lui montra l'utilisation du pompage optique pour orienter le moment magnétique d'atomes grâce à de la lumière polarisée.

Les électrons possèdent deux état quantiques distinct définis par leur spin,  $\frac{1}{2}$  ou  $-\frac{1}{2}$ . Ces deux états n'ont pas la même énergie donnant ainsi deux niveaux d'énergie magnétique. Grace à de la lumière polarisée Albert Kastler parvenait à changer le spin des électrons d'un atome. Il était ainsi capable de faire passer les atomes d'un niveau d'énergie à un autre en utilisant ce qu'il appelait un pompage optique. En utilisant et généralisant ce pompage optique Charles Townes pressenti qu'il était possible de passer des Micro-ondes à la Lumière créant ainsi le LASER.

# Résumé

Actuellement les LEDs représentent une part de plus en plus importante de l'éclairage mondial. Cependant des recherches récentes ont permis de développer une solution encore plus économe en énergie que les LEDs en couplant optiquement des diodes laser à un luminophore. Les diodes laser fonctionnent sur un principe similaire aux LEDs mais permettent d'obtenir une puissance lumineuse plus élevée. A puissance égale, ceci permet d'utiliser moins de diodes laser et donc de grandement réduire la problématique due au réseau de sources lumineuses. Ces diodes laser sont aussi moins sujettes à l'emballement thermique que les LEDs. Cette solution comporte malgré tout quelques défauts : une diode laser demande une dissipation thermique accrue et produit un niveau de lumière bleue plus important en sortie qu'une LED. Le but de ce manuscrit est d'étudier la caractérisation et la modélisation d'un couplage diode laser/luminophore afin de pouvoir définir les axes d'amélioration de cette technologie ainsi que réaliser un modèle expérimental.

**MOTS-CLES – Diode laser, Luminophore, Chromaticité, Diffusion de Mie, LightTools, Efficacité quantique.**

# Abstract

Currently, Light Emitting Diodes or LEDs are an increasingly important part of global lighting. However, recent research has made possible to develop an even more energy efficient solution than LEDs by optically coupling laser diodes to a remote phosphor. Laser diodes operate on a principle similar to LEDs but allow to obtain a higher luminous power. In fact for an equivalent luminous power, this allows to use less laser diodes and thus greatly reduce problems caused by using a network of light sources. Laser diodes are also less prone to thermal runaway than LEDs. However, this solution isn't perfect: a laser diode requires more heat dissipation and produces a higher level of blue light output than an LED. The aim of this manuscript is to study the characterization and the modeling of a diode laser / phosphor coupling in order to be able to define the axes of improvement of this technology as well as to realize an experimental model.

**KEYWORDS–Laser diode, Phosphor, Chromaticity, Mie scattering, LightTools, Quantic efficiency.**