

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU

FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

MÉMOIRE DE MASTER

Filière : Physique

Spécialité : Nanophysique

Présenté par :

Sarah SADOUN

Thème
**Etude de la dynamique du laser Q-déclenché
à double cavité avec le model ponctuel**

Soutenu le 17 Juillet 2022

Devant ce jury d'examen composé de :

BOUKLLAL Ali	Professeur	U.M.M.T.O	Président
DJELLOUT Hocine	MCA	U.M.M.T.O	Encadreur
HARCHAOUI Nadra	MCA	U.M.M.T.O	Examineur

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude à mes parents et ma famille pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont endurés. Je remercie mon promoteur Mr DJELLOUT pour les efforts qu'il a déployés, pour m'aider, conseiller, encourager et corriger. Je voudrais remercier les membres de jury pour avoir accepté d'examiner mon travail. Je remercie aussi tout le corps enseignant dans le département de physique qui a contribué à ma formation universitaire. Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicaces

A mon père et ma mère

Résumé

Le déclenchement Q-switch est un moyen efficace pour lancer le fonctionnement d'un laser en régime impulsionnel. Le principe du premier laser déclenché émettant des impulsions a été rapporté en 1963, soit trois années après la première démonstration expérimentale d'un laser. Les impulsions émises, grâce à cette technique, sont de longues durées et énergétiques. Dans ce mémoire nous présentons une étude de la dynamique d'un laser à fibre à double cavité passivement Q-déclenché dopée Er-Tm émettant à deux longueurs d'ondes 1570nm et 1860nm, et ce par l'application du modèle ponctuel. Quelques caractéristiques de sortie des deux signaux obtenus à 1570nm et 1860nm sont étudiées en faisant varier certains paramètres, tels que la puissance pompe et les densités des ions Tm et Er. Les paramètres de simulation utilisés ont été repris d'un article publié par Tao où une simulation sur la même structure laser a été établie.

Abstract

Q-switching is an useful way of operating a laser in a pulsed mode. The principle of the first triggered laser emitting pulses was reported in 1963, that's to say three years after the first experimental demonstration of a laser . The pulses emitted with this technique are of long duration and high energy. In this work we present a study of the dynamics of an Er-Tm doped passively Q-switched double cavity fiber laser emitting at two wavelengths 1570 nm and 1860 nm by applying the point model. Some output characteristics of the two signals obtained at 1570nm and 1860nm are studied by varying some parameters, such as pump power and the Tm and Er ions densities. The used simulation parameters were taken from a paper published by Tao where a simulation on the same laser structure was achieved.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	4
Table des figures	8
Liste des tableaux	10
1 Généralités	12
1.1 Introduction	12
1.2 Fibre optique	12
1.2.1 Structure de la fibre optique	12
1.2.2 Caractéristiques des fibres optiques	13
1.2.2.1 transmission par fibre optique et ouverture numérique	13
1.2.2.2 Fréquence normalisée	14
1.3 Les terres rares	14
1.3.1 Introduction	14
1.3.2 Propriétés électroniques	15
1.3.3 Durée de vie d'un niveau d'énergie	16
1.4 Interaction rayonnement-matière	16
1.4.1 Transitions radiatives	17
1.4.1.1 Absorption	17
1.4.1.2 Emission spontanée	17
1.4.1.3 Emission stimulée	17
1.4.2 Transitions non-radiatives	18
1.5 Laser –Historique	18

1.6	LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations)	19
1.7	Principe de fonctionnement en régime continu	19
1.8	Laser Q-déclenché (Q-Switch)	20
1.8.1	Principe de fonctionnement d'un laser Q-déclenché (Q-Switch)	20
1.8.2	Méthodes de déclenchement	21
1.8.2.1	Déclenchement actif	21
1.8.2.2	Déclenchement passif	21
1.9	Conclusion	22
2	Étude de la dynamique d'un laser à double cavités passivement Q-déclenché	23
2.1	Introduction	23
2.2	Laser fibré passivement Q-déclenché	23
2.3	laser impulsionnel passivement Q-déclenché à double cavités	24
2.4	Modélisation d'un laser fibré passivement Q-déclenché à double cavité dopée Er -Tm avec le modèle ponctuel	25
2.4.1	Modèle théorique	25
2.4.2	les équations de populations	26
2.5	Simulation et résultats	27
2.5.1	Étude de l'influence de la puissance pompe sur les différent régime du laser	29
2.5.1.1	Détermination de la puissance pompe seuil	29
2.5.1.2	Dynamique du Laser	30
2.5.2	Étude de l'influence de la densité Tm (N Tm) sur le régime de fonctionnement du laser	31
2.5.3	Étude de l'influence de l'émission spontanées sur le fonctionnement du laser	33
2.6	Conclusion	36
	Bibliographie	38

Table des figures

1.1	Strucutre d'une Fibre Optique	13
1.2	Cône d'acceptance de la fibre	14
1.3	La famille des terres rares	15
1.4	Distribution radiales de probabilité des orbitales 4f, 5s, 5p	16
1.5	Interaction rayonnement-matière	17
1.6	Structure d'un Laser	19
1.7	Niveaux d'énergies du milieu actif	20
1.8	Schéma d'un laser Q-déclenché	21
1.9	Schéma de principe de la création d'un impulsion dans un laser Q-switch	22
2.1	Laser Q-Déclenché à double cavités passivement Q-déclenché dopé $Er - Tm$	25
2.2	Transitions énergétique associe au système laser	26
2.3	Train d'impulsion de signal de sortie laser à 1570 nm et à 1860 nm	28
2.4	Densité de populations des ions Er et Tm en fonction de temps	28
2.5	Variation de la puissance pompe seuil en fonction de L et N_{Er}	29
2.6	variation de la puissance pompe seuil en fonction de L_s et N_{Tm}	30
2.7	Train d'impulsion de signal de sortie laser à 1570 nm et à 1860 nm à $p > 433W$	31
2.8	Densité de population des ions Er et Tm à $p > 433W$	31
2.9	Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $N_{Tm} = 4.10^{10}m^{-3}$	32
2.10	Densité de population des ions Er et Tm à $N_{Tm} = 4.10^{10}m^{-3}$	32
2.11	Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $N_{Tm} = 5.10^{25}m^{-3}$	33
2.12	Densité de population des ions Er et Tm à $N_{Tm} = 5.10^{25}m^{-3}$	33
2.13	Train d'impulsion de signal de sortie laser à 1570 nm et à 1860 nm $\beta = 1.10^{-7}s^{-1}$	34
2.14	Densité de population des ions Er et Tm à $\beta = 1.10^{-7}s^{-1}$	34
2.15	Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $\beta = 1.10^{-30}s^{-1}$	35

2.16	Densité de population des ions Er et Tm à $\beta = 1.10^{-30} s^{-1}$	35
2.17	Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $\beta = 1.10^{-23} s^{-1}$	36
2.18	Densité de population des ions Er et Tm à $\beta = 1.10^{-23} s^{-1}$	36

Liste des tableaux

2.1	La gamme spectrale d'amplification pour le laser à fibre dépend du dopant terre rare utilisé dans la fibre active	24
2.2	Les paramètres du laser utilisés	27

Introduction générale

Les lasers, par leurs efficacités, continuent à nous étonner. Leurs performances sont toujours plus extraordinaires et le champ de leurs applications ne cesse de s'étendre. Ils sont omniprésents dans notre vie quotidienne, peu à peu imposé dans notre vie sans que nous en soyons forcément conscients. Incontournable dans la fabrication industrielle, il est tout aussi indispensable au fonctionnement de systèmes en télécommunications (Internet, téléphonie, . . .) et joue un rôle crucial dans le domaine médicale. De nos jours, toute l'industrie du numérique (musique, vidéo, informatique) repose sur les lasers. De plus en plus utilisés pour l'analyse des matériaux, on les trouve dans les laboratoires d'investigation de police scientifique, dans les usines de l'agroalimentaire. Malgré sa production massive et afin d'améliorer ses performances, le laser fait encore l'objet de recherches intenses, pour atteindre des puissances plus élevées, des impulsions plus courtes, des caractéristiques spectrales meilleures, des rendements plus importants, ou tout simplement de nouvelles longueurs d'ondes. Les lasers à fibre possèdent un historique de longue date. Ils ont été inventés pour la première fois par Elias Snitzer en 1963 [1]. Cependant, les premiers modèles commerciaux ne sont apparus sur le marché qu'à la fin des années 1980. Notre étude, présentée dans ce mémoire, porte sur la dynamique d'un laser à fibre passivement Q-déclenché Er-Tm à double cavités, que l'on a modélisé et simulé en utilisant le modèle ponctuel. Dans le premier chapitre sont exposés, des rappels sur les fibres optiques, les terres rares, et le principe de fonctionnement des lasers en régime continu et impulsionnel Q-déclenché. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des lasers à double cavités passivement Q- déclenchés, sont développées les procédures la de modélisation et de la simulation avec le modèle ponctuel, le fonctionnement dynamique de ces lasers.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

Ce chapitre présente un aperçu des concepts théoriques ayant été utilisés dans la réalisation de cette étude. Nous aborderons en premier lieu le principe de fonctionnement d'un laser en régime continu ainsi que la fibre optique et les terres rares, ensuite nous présenterons les lasers en régime impulsionnel(Q-Switch).

1.2 Fibre optique

1.2.1 Structure de la fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde optique constitué d'un premier milieu d'indice de réfraction n_1 , appelé cœur, entouré d'un second milieu, d'indice de réfraction n_2 inférieur à n_1 , appelé gaine. L'ensemble est recouvert d'une gaine en plastique de protection pour une meilleure résistance mécanique [2],

La figure(1.1) présente la structure de la fibre optique

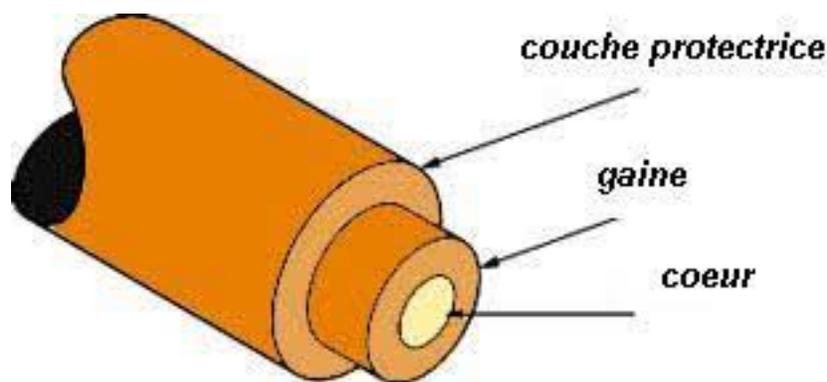


Figure 1.1: Structure d'une Fibre Optique

1.2.2 Caractéristiques des fibres optiques

1.2.2.1 transmission par fibre optique et ouverture numérique

La transmission dans une fibre optique se fait par réflexion totale interne sur l'interface cœur gaine. Ainsi le rayon lumineux est guidé par réflexion successive sur cette interface, et pour que la réflexion totale soit réalisée, il est nécessaire que l'angle d'incidence du rayon lumineux sur la face d'entrée de la fibre soit inférieure à un angle critique qu'on appelle ouverture numérique. Seuls les rayons proches de l'axe principal de la fibre optique peuvent être guidés. On définit alors l'ouverture numérique qui est l'angle d'acceptance maximal qu'un rayon se propageant dans l'air ne doit pas dépasser pour qu'il soit guidé dans la fibre [3].

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1)$$

la figure (1.2) montre l'angle maximal d'injection d'un signal dans une fibre optique.

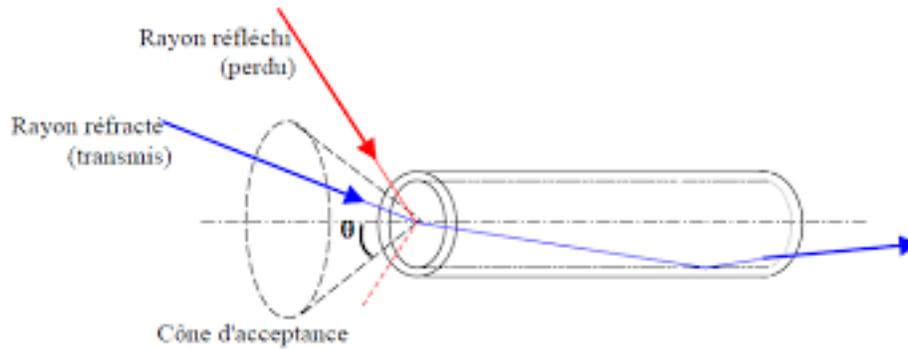


Figure 1.2: Cône d'acceptance de la fibre

1.2.2.2 Fréquence normalisée

La fréquence normalisée est déterminée en résolvant l'équation de propagation dans la fibre optique en appliquant les conditions aux limites (cœur/gain). On définit le paramètre V par [4]

$$V = aK_0\sqrt{n_C^2 - n_G^2} = a\frac{2\pi}{\lambda_0}n_C\sqrt{2\Delta} \quad (1.2)$$

Où $\lambda_0 = \frac{2\pi}{K_0}$ est la longueur d'onde dans le vide, K_0 est son vecteur d'onde et $2\Delta = \frac{n_C^2 - n_G^2}{n_C^2}$ le paramètre de guidage

La valeur de V détermine si la fibre est monomode ou Multimode

Si $V < 2.405$ un seul mode se propage (mode fondamental), la fibre est dite monomode

Si $V > 2.405$ plusieurs modes peuvent se propager, la fibre est dite multimode.

1.3 Les terres rares

1.3.1 Introduction

Les ions de terres rares appartiennent à la famille des lanthanides et leurs propriétés spectroscopiques sont pratiquement insensibles à leurs environnements extérieurs. Ils émettent sur une large gamme optique allant de l'infrarouge (Nd, Er, Yb) à l'UV (Gd) et sont particulièrement utilisés dans le dopage des fibres optiques amplificatrices à base de silice et les lasers de puissance.. [5]

les elements terres rare sont presentés sur la figure (1.3)

H																	He				
Li	Be	Terres rares														B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	La-Lu *	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	Ac-Lr **	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Os	Rg											

* Lanthanides

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

** Actinides

Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Figure 1.3: La famille des terres rares

1.3.2 Propriétés électroniques

Les terres rares regroupent 17 éléments, allant du Lanthane La($Z=57$) au Lutécium Lu(71). Les propriétés optiques de leurs ions rares découlent de leur configuration électronique $[Xe] 4f^n 5d^1 6s^2$, où $[Xe]$ correspond à la configuration électronique du Xénon. Les couches extérieures sont identiques, 14 électrons remplissent progressivement la couche interne 4f. Les orbitales 4f sont optiquement radiatives et ont une faible extension radiale, elles sont écrantées par les couches externes 5s 5p⁶ qui les protègent de l'environnement extérieures, [6] comme montre la figure (1.4) illustrant les distributions de probabilité radiales des orbitales 4f, 5s et 5p. Les électrons de la couche 4f sont pratiquement insensibles au milieu extérieur et les propriétés spectroscopiques sont très peu influencées par le milieu extérieur dans lequel se trouvent les terres rares. [7]

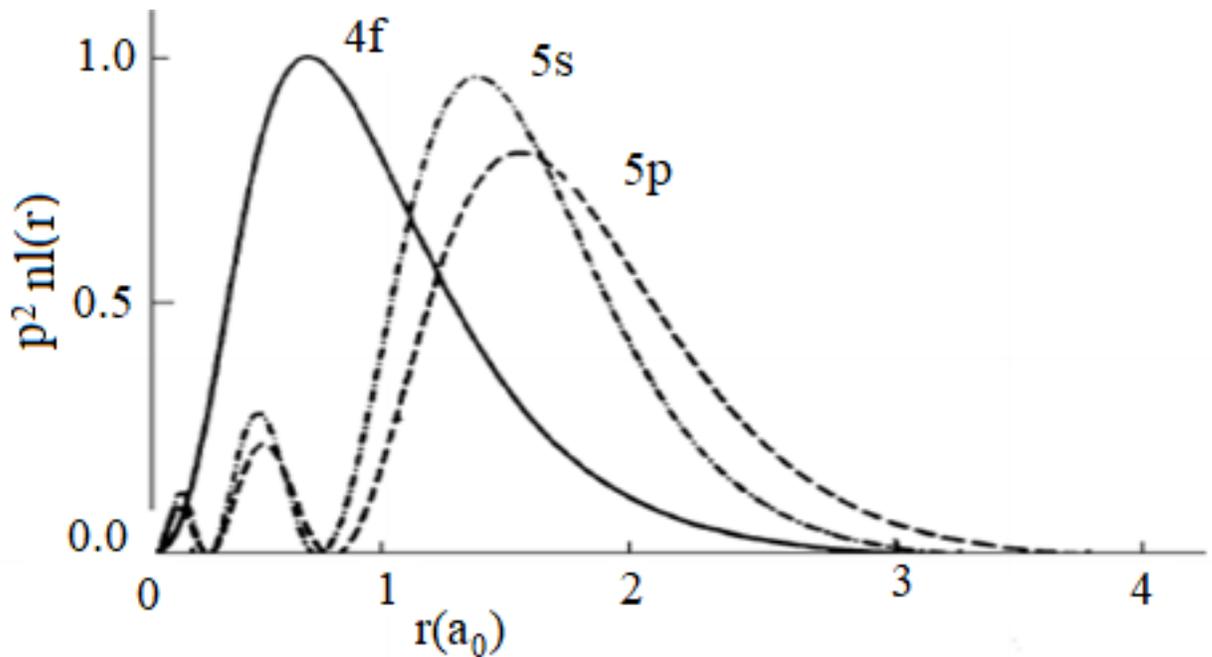


Figure 1.4: Distribution radiales de probabilité des orbitales 4f, 5s, 5p

1.3.3 Durée de vie d'un niveau d'énergie

L'électron peut revenir à son état initial par deux processus (radiatif ou non radiatif). La probabilité totale de relaxation W_T s'écrit : [8]

$$W_T = \sum_j (A_{ij} + W_{NRj}) \quad (1.3.a)$$

où A_{ij} désigne la probabilité de relaxation radiative et W_{NRj} la probabilité de relaxation non-radiative

$$W_T = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{NR}} = \frac{1}{\tau} \quad (1.4.a)$$

τ_{rad} est la durée de vie radiative, τ_{NR} est la durée de vie non-radiative, τ est la durée de vie moyenne effective

1.4 Interaction rayonnement-matière

Les principaux processus d'interaction entre l'atome et un rayonnement ont été modélisés par A-EINSTEIN en 1917 [6] [9].

1.4.1 Transitions radiatives

Les transitions radiatives sont les transitions qui se produisent entre deux niveaux d'énergies, ce processus s'accompagne d'une émission ou d'absorption d'une quantité d'énergie, sous forme de photons. [18]

1.4.1.1 Absorption

L'atome passe de son état d'énergie E_1 , à son état excité d'énergie E_2 , en absorbant un photon.

1.4.1.2 Emission spontanée

L'atome initialement dans son état excité d'énergie E_2 se désexcite vers son état d'énergie E_1 en émettant un photon, cette émission, comme son nom l'indique se produit d'une manière spontanée.

1.4.1.3 Emission stimulée

Un atome qui se trouve dans un état excité d'énergie E_2 peut se désexciter par émission stimulée au passage d'un photon d'une énergie égale à $E_2 - E_1$, ainsi le photon émis par l'atome va avoir les mêmes caractéristiques que le photon qui a désexcité l'atome, les deux photons seront alors exactement identiques.

La figure (1.5) présente les trois transitions radiatives.

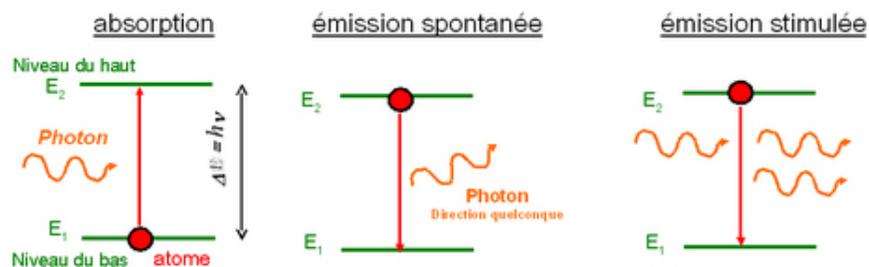


Figure 1.5: Interaction rayonnement-matière

1.4.2 Transitions non-radiatives

Quand un ion ou un atome se trouve dans un état excité, les transitions de ces derniers vers des niveaux d'énergie inférieurs se font soit par des transitions radiatives, c'est-à-dire par l'émission de photons, soit par un autre mécanisme qui n'implique pas la lumière dans leurs processus. Il s'agit des transitions dites non-radiatives, l'excès d'énergie ici est dissipée sous forme de phonons qui sont associées aux vibrations du réseau.

1.5 Laser –Historique

Le premier laser a vu le jour en mai 1960 [10], dans un petit laboratoire industriel à Malibu en Californie. Il s'agissait d'un laser à rubis, fonctionnant en mode impulsif dans le rouge. Son inventeur, Theodore Maiman, créait ainsi le premier laser, concrétisant la proposition faite, deux ans plus tôt, par Arthur Schawlow et Charles Townes de réaliser un oscillateur optique, basé sur le modèle des masers inventés en 1954 dans le domaine des micro-ondes. Cependant, passer au domaine optique était loin d'être évident, et de nombreux chercheurs s'y consacraient dans leur laboratoire. Le succès de Maiman fut rapidement suivi par beaucoup d'autres. Le premier laser hélium-néon fut mis au point quelques mois plus tard par Ali Javan aux Bell Labs [11]. Au cours des années suivantes, une grande variété de lasers vit le jour, fonctionnant avec des milieux et des longueurs d'onde de plus en plus diversifiés. De nos jours, cette «curiosité de laboratoire» est devenue un objet courant de la vie quotidienne [8] [19].

1.6 LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations)

Un laser est un oscillateur optique capable de délivrer une lumière cohérente. Il est composé d'un milieu amplificateur, d'une cavité optique résonnante constituée de deux miroirs parallèles permettant à la lumière de faire des allers retours dans le milieu amplificateur et d'un système de pompage qui fournit de l'énergie à ce milieu, ce

milieu étant constitué soit d'atomes, de molécules, d'ions ou d'électrons[12]. L'ensemble est présenté sur la figure(1.6).

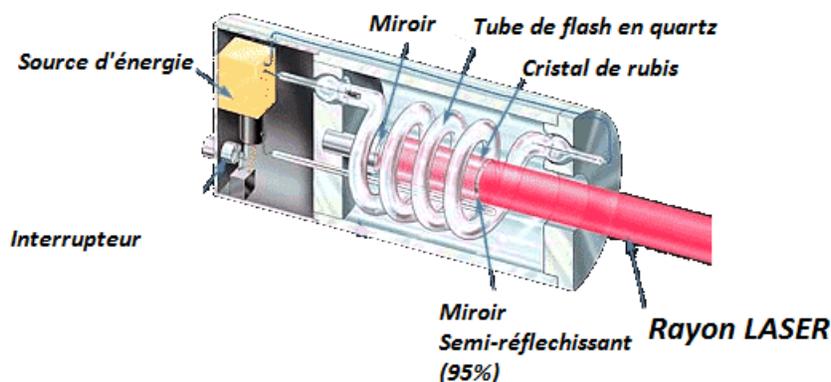


Figure 1.6: Structure d'un Laser

1.7 Principe de fonctionnement en régime continu

Un faisceau laser se produit lorsqu'un grand nombre d'atomes libèrent simultanément de l'énergie sous forme de photons en passant d'un état excité supérieur à un état d'énergie inférieur par émission stimulée. Pour que cette action soit possible, les atomes doivent d'abord être excités à un état d'énergie plus élevé pour qu'une émission stimulée se produise (figure (1.7)). Cet état est obtenu par inversion de population. Un processus laser commence à s'établir à partir d'un bruit (émission spontanée) qui se transforme en émission stimulée par amplification de l'intensité du faisceau généré effectuant des allers retours dans la cavité optique. Au bout d'un certain temps, il s'établit un équilibre entre l'opération de

pompage qui tend à augmenter l'inversion de population et le processus d'émission stimulée qui tend à la diminuer, il apparaît alors un état stationnaire pour lequel un faisceau laser est délivré de façon continue par le miroir de sortie [13].

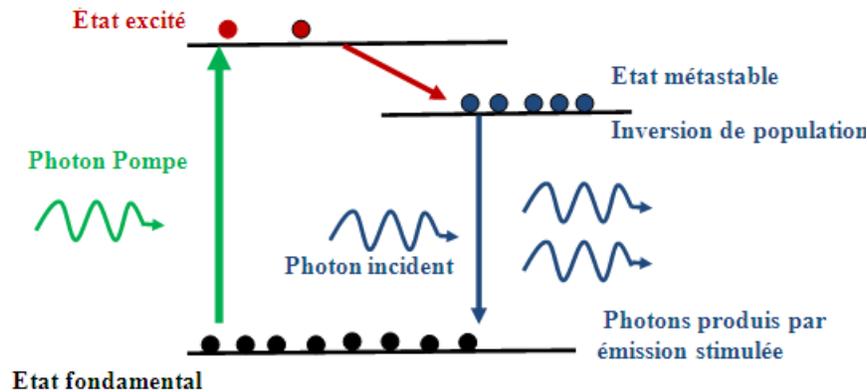


Figure 1.7: Niveaux d'énergies du milieu actif

1.8 Laser Q-déclenché (Q-Switch)

1.8.1 Principe de fonctionnement d'un laser Q-déclenché (Q-Switch)

Afin de réaliser un laser Q-Switch, il est nécessaire d'introduire un modulateur optique à l'intérieur de la cavité laser. Ce modulateur a pour but de faire varier le facteur de qualité de la cavité en modifiant le coefficient de pertes sur un aller-retour. Au démarrage de la pompe, le modulateur optique est opaque, il n'y a donc pas encore un flux de photons important dans la cavité ce qui engendre une augmentation de l'inversion de population. Lorsqu'on déclenche la cavité en abaissant les pertes, le modulateur optique devient transparent, toutes l'énergie emmagasinée par inversion de population se trouve alors restituée par émission stimulée sous forme d'une impulsion géante de courte durée [14].

La figure (1.8) présente un schéma d'un laser Q-déclenché.

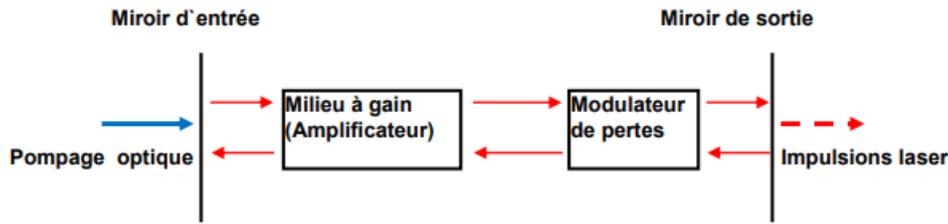


Figure 1.8: Schéma d'un laser Q-déclenché

1.8.2 Méthodes de déclenchement

1.8.2.1 Déclenchement actif

Dans le cas du déclenchement actif, le contrôle du modulateur optique se fait d'une manière active. Le moyen le plus simple de le réaliser est par exemple, l'utilisation d'un dispositif opto-mécanique comme un miroir tournant qui cependant, présente beaucoup d'inconvénients. Les modulateurs actifs les plus utilisés sont les modulateurs électro-optiques et acousto-optiques [14].

1.8.2.2 Déclenchement passif

L'utilisation d'un cristal absorbant saturable pour le déclenchement passif permet une absorption non linéaire de l'intensité lumineuse qu'il reçoit. Lorsqu'il est soumis à une faible intensité, il provoque le blocage de l'oscillation laser en introduisant des fortes pertes dans la cavité, ce qui permet une augmentation du gain qui à son tour fait augmenter l'émission spontanée amplifiée. Lorsque cette dernière atteint le seuil de blanchissement de l'absorbant saturable, cet absorbant devient transparent laissant ainsi les oscillations laser s'établir. Toutes l'énergie emmagasinée pendant ce blocage est alors libérée sous forme d'une impulsion de forte puissance [14] [15].

Le processus de la création de cette impulsion est montré dans la figure(1.9).

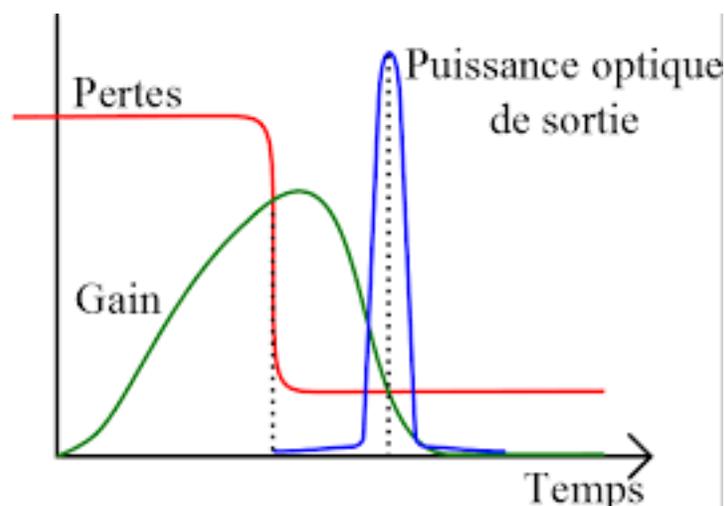


Figure 1.9: Schéma de principe de la création d'une impulsion dans un laser Q-switch

1.9 Conclusion

Ce chapitre est consacré aux rappels des notions de base sur le principe de fonctionnement des lasers à fibres. On a rappelé quelques propriétés relatives aux fibres optiques ainsi qu'à la spectroscopie des terres rares qui sont les dopants des milieux actifs. Par suite nous avons présenté un aperçu sur le principe de fonctionnement des lasers en régime continu et en dernier lieu, nous avons présenté les lasers fonctionnant en régime impulsionnel activement Q-déclenché et passivement Q-déclenché. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude et à la modélisation de la dynamique d'un laser passivement Q-déclenché à double cavité.

Chapitre 2

Étude de la dynamique d'un laser à double cavités passivement Q-déclenché

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on présentera en premier lieu le principe de fonctionnement des lasers passivement Q-déclenchés, on exposera par la suite l'architecture du système mis en jeu dans cette étude, on entamera la partie simulation en mettant au préalable en évidence les équations sur qui repose le modèle ponctuel qui constitue la base de ce travail, et on finira par l'exposition des résultats de simulations sur la dynamique de ce laser et en fin une conclusion.

2.2 Laser fibré passivement Q-déclenché

Q-déclenché une cavité laser consiste à créer dans celle-ci des pertes variables dans le temps qui vont empêcher l'effet laser de se produire pendant un certain temps, durant lequel l'énergie de pompage est stockée dans le niveau excité du matériau à gain du laser. Les pertes variables sont créées à l'aide d'un matériau Absorbant Saturable (A.S), qui est fortement absorbant à la longueur d'onde du laser et à faible densité de puissance, et qui devient pratiquement transparent lorsque cette densité dépasse un certain seuil qu'on

appelle intensité de saturation de l'A.S, ces pertes sont brusquement diminuées, à des moments précis, libérant ainsi l'énergie emmagasinée en un temps très court. Le but de ce type de laser est de produire des impulsions lumineuses de courte durée. L'énorme avantage du déclenchement passif est qu'il ne nécessite aucune électronique de pilotage.

2.3 laser impulsionnel passivement Q-déclenché à double cavités

Comme tout type de laser le principe reste le même, il faut une cavité, un milieu amplificateur et un système de pompage, il se fait souvent par une diode laser, un laser Q-déclenché à double cavités consiste à introduire un absorbant saturable mais cette fois ci on le met dans une deuxième cavité placée à l'intérieure de la cavité contenant le milieu a gain, afin d'obliger ces absorbant à se désexciter plus rapidement par émission stimulée pour diminuer la durée de vie de leur niveau métastable. Il permet de générés des impulsions nanoseconde avec des puissances moyennes qui peuvent atteindre plusieurs centaines de watts ainsi qu'une énergie de quelques milli-joules. L'amplification optique dans ces lasers à fibres dopées tient le plus généralement avantages des transitions radiatives de quelques terres rares qui sont l'ytterbium (Yb), l'erbium (Er) et le thulium (Tm) [16].

Dopant	Gamme d'ampilification Laser
Yb^{3+}	1030-1100 nm
Er^{3+}	1530-1620 nm
Tm^{3+}	1800-1900 nm
Nd^{3+}	1050-1090 nm

Tableau 2.1: La gamme spectrale d'amplification pour le laser à fibre dépend du dopant terre rare utilisé dans la fibre active

2.4 Modélisation d'un laser fibré passivement Q-déclenché à double cavité dopée Er -Tm avec le modèle ponctuel

2.4.1 Modèle théorique

En 2015, Tao a Modélisé et simulé le fonctionnement d'un laser a double cavité à com-
 mutation du gain et passivement Q- déclenché dopé Er-Tm avec le modèle ponctuel. Ce
 laser est composé d'une source de pompage CW couplée par un WDM, une cavité à fibre
 optique principale formée de deux réseaux de Bragg FBG1 et FBG2, dopée Er, une cavité
 à fibre optique dopée Tm formée par les deux réseaux FBG3 et FBG4. Comme le présente
 la figure (2.1) [17].

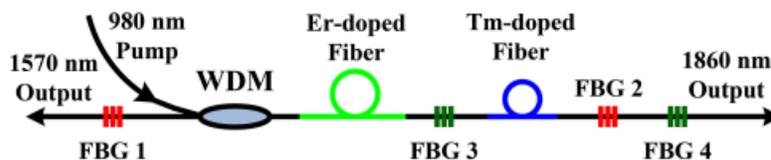


Figure 2.1: Laser Q-Déclenché à double cavités passivement Q-déclenché dopé $Er - Tm$

CW : pompe à onde continue (continuous wave), composé de plusieurs diodes lasers.

WDM : Le multiplexage en longueur d'onde , il joue le rôle d'un coupleur.

FBG c'est un filtre simple intégré au cœur d'un câble à fibre optique spécifique à la longueur d'onde , ils sont utilisés comme filtre optique pour bloquer certaines longueur d'onde ou comme un réflecteur spécifique à la longueurs d'onde , pour améliorer le signal laser et stabiliser la sortie laser .

Les niveaux d'énergie et les transitions laser sont présentés dans la figure (2.2) .

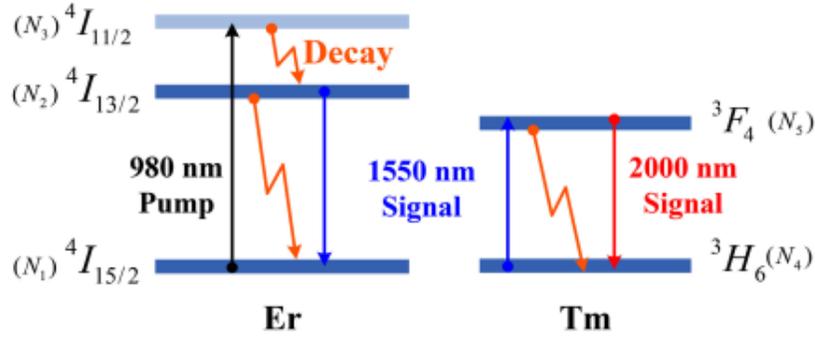


Figure 2.2: Transitions énergétique associée au système laser

2.4.2 les équations de populations

les équations cinétiques régissant le fonctionnement du laser Q-déclenché dopée Er-Tm sont les suivantes :

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{\tau_r} \{ [\sigma_e N_2 - \sigma_a (N_{Er} - N_2)] 2l + [\sigma_{es-sa} N_5 - \sigma_{as-sa} (N_{Tm} - N_5)] 2l_s - [\delta - \ln(R_1 R_2)] \} + \beta N_2 \quad (2.1.a)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{\lambda_p \sigma_{ap}}{A h c} P (N_{Er} - N_2) - \frac{N_2}{\tau_2} - \frac{c}{n} \phi [\sigma_e N_2 - \sigma_a (N_{Er} - N_2)] \quad (2.1.b)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi}{\tau_{rs}} \{ [\sigma_{es} N_5 - \sigma_{as} (N_{Tm} - N_5)] 2l_s - [\delta - \ln(R_3 R_4)] \} + \beta N_5 \quad (2.1.c)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = - [\sigma_{es-sa} N_5 - \sigma_{as-sa} (N_{Tm} - N_5)] \frac{c}{n} \phi - \frac{N_5}{\tau_5} - \frac{c}{n} \varphi [\sigma_{es} N_5 - \sigma_{as} (N_{Tm} - N_5)] \quad (2.1.d)$$

ϕ : la densité de photons à l'intérieure de la cavité à 1570 nm .

φ : la densité de photons à l'intérieure de la cavité à 1860 .

N_{Tm} : Densité totale de population des ions thulim .

N_{Er} : Densité totale de population des ions erbium .

σ_e : section efficace d'émission .

σ_a : section efficace d'absorption .

β : coefficient d'émission spontanée.

$R_1 R_2 R_3 R_4$: réflectivités des erseaux FBG_1, FBG_2, FBG_3 et FBG_4 respectivement .

τ_2, τ_5 : durée de vie de vie des niveaux d'énergie N_2 et N_5

τ_r temps d'aller retour dans la cavité dopé Er .

τ_{rs} temps d'aller retour dans la cavité dopé Tm .

ou

$$\tau_{rs} = \frac{2n(l_p + l_s + l)}{c} \quad (2.2.a)$$

$$\tau_r = \frac{2n(l_p + l_s + 1)}{c} \quad (2.2.b)$$

P puissance de la pompe à 980nm , λ_p sa longueur d'onde .

Les différents paramètres utilisés dans les simulations numériques sont énumérés dans le tableau (2.1).

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
N_{Er}	$1.41 \times 10^{25} m^{-3}$	N_{Tm}	$3 \times 10^{25} m^{-3}$	β_1	$1 \times 10^{-7} s^{-1}$
τ_2	$10ms$	τ_5	$334.7\mu s$	β_2	$1 \times 10^{-7} s^{-1}$
σ_{as}	$0.56 \times 10^{-25} m^2$	σ_{es}	$5.96 \times 10^{-25} m^2$	σ_{es-sa}	$1.44 \times 10^{-25} m^2$
σ_a	$4.6 \times 10^{-16} m^2$	σ_e	$2.3 \times 10^{-25} m^2$	σ_{as-sa}	1.44×10^{-24}
R_1	0.3	R_2	0.3	R_3	1
R_4	0.2	N	1.5	σ_{ap}	$3.1 \times 10^{-25} m^2$
l_{sa}	$0.4m$	l	$9m$	δ_1	0.01
h	6.626×10^{-34}	c	$3 \times 10^8 m/s$	δ_2	0.01
A	$63.6 \times 10^{-12} m^2$	λ_p	$980 \times 10^{-9} m$		

Tableau 2.2: Les paramètres du laser utilisés

2.5 Simulation et résultats

En utilisant les mêmes équations et paramètres utilisés par TAO et AL, avec un code MATLAB, nous avons simulé le fonctionnement du laser à fibre dopée Er-Tm passivement Q-déclenché avec le modèle ponctuel. Les figures (2.3) et (2.4) montrent respectivement la densité de photon à 1570nm, 1860nm et l'évolution de l'inversion de population des ions Er et Tm en fonction du temps pour une puissance de pompe de 2 W. les deux figures montrent

l'existence de deux trains d'impulsions à 1570nm et 1860nm avec la même fréquence de répétition des impulsions pour les deux signaux laser.

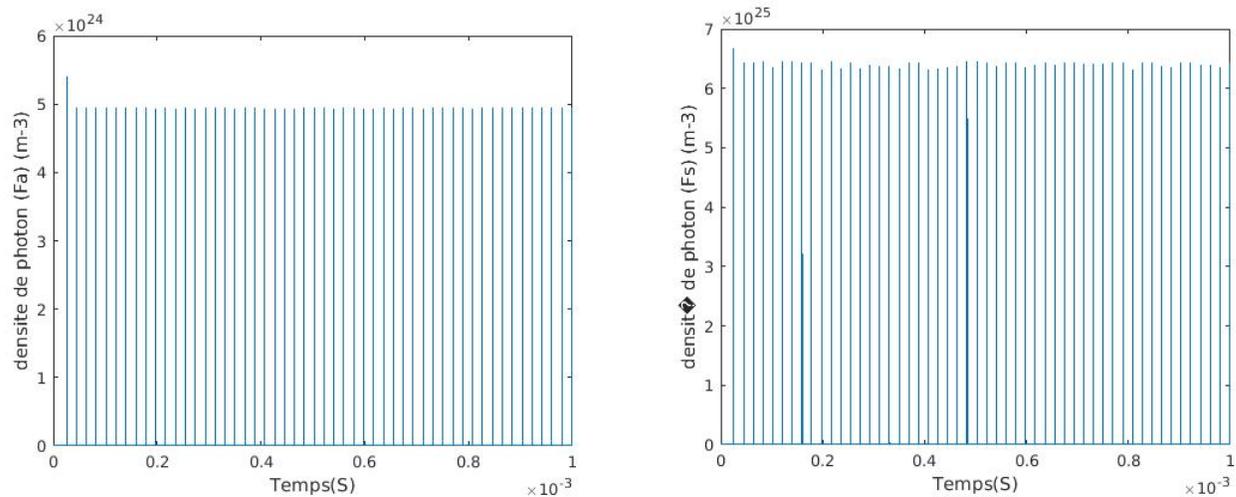


Figure 2.3: Train d'impulsion de signal de sortie laser à 1570 nm et à 1860 nm

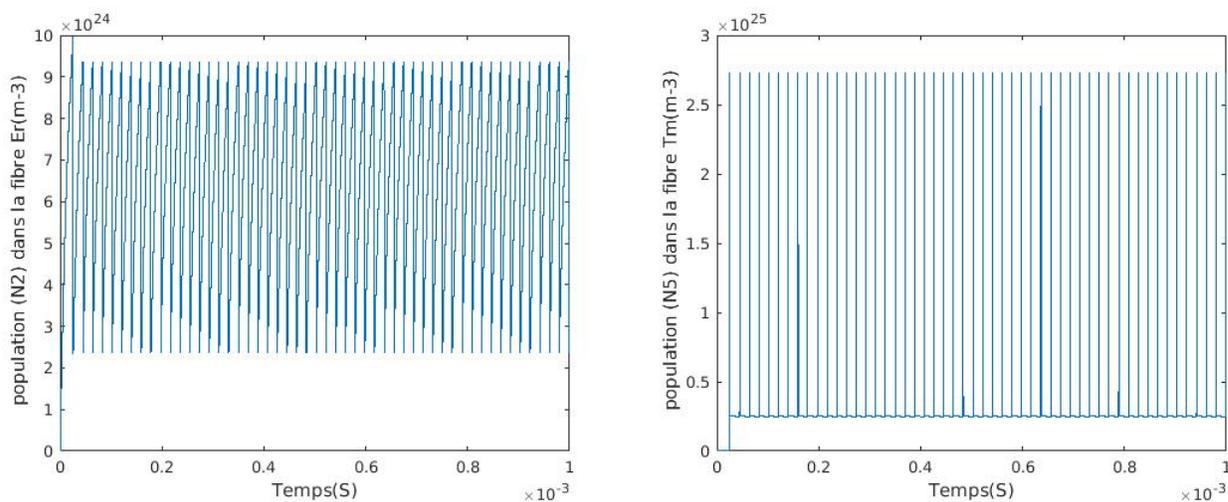


Figure 2.4: Densité de populations des ions Er et Tm en fonction de temps

2.5.1 Étude de l'influence de la puissance pompe sur les différent régime du laser

2.5.1.1 Détermination de la puissance pompe seuil

On peut déterminer la puissance de pompe nécessaire pour atteindre le seuil d'oscillation, en faisant varier la puissance de pompe P de 0 jusqu'à l'obtention des impulsions sur les deux longueurs d'ondes.

Puissance pompe seuil en fonction de la longueur de la fibre dopée Er et la densité d'atome Er

La figure (2.5-a) représente la variation de la puissance pompe seuil en fonction de la longueur de la fibre Er et la figure (2.5-b) représente l'évolution de la puissance pompe seuil en fonction de la densité d'atomes Er. Quand la fibre dopée Er est courte ou sa densité est faible, la puissance pompe seuil nécessaire au fonctionnement du laser est grande, ceci s'explique par le fait que le nombre d'atomes du milieu amplificateur (N_{Er}) sont insuffisant pour enclencher le laser, par contre, en augmentant la longueur de la fibre ou la densité d'atomes Er, la puissance pompe seuil diminue fortement pour se stabiliser pratiquement à une valeur fixe malgré l'augmentation de la fibre dopée Er ou sa densité, ceci s'explique par le modèle ponctuel utilisé dans les simulations, qui ne tient pas compte de la variation spatiale-temporelle des différents signaux laser se propageant dans la fibre.

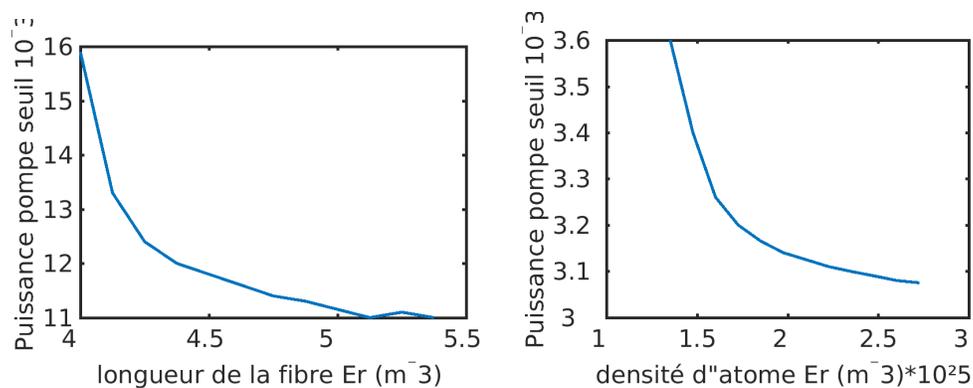


Figure 2.5: Variation de la puissance pompe seuil en fonction de L et N_{Er}

Puissance pompe seuil en fonction de la longueur de la fibre dopée Tm et de sa densité D'après la figure (2.6) on remarque également que la puissance pompe seuil

dépend aussi de la longueur de la fibre T_m et de sa densité, quand la fibre est courte et la densité est faible, la puissance pompe seuil nécessaire au fonctionnement du laser est faible, car les pertes sont faibles, en effet, l'absorbant saturable, n'absorbe pratiquement rien et donc c'est comme si il n'y a pas d'absorbant saturable dans la cavité, le laser ne fonctionnent pas en mode Q- déclenché. Et pour une longue fibre ou une grande densité T_m , les pertes liées à l'absorbant saturable sont élevées, ce qui nécessite des grandes puissances pompes pour le fonctionnement du laser.

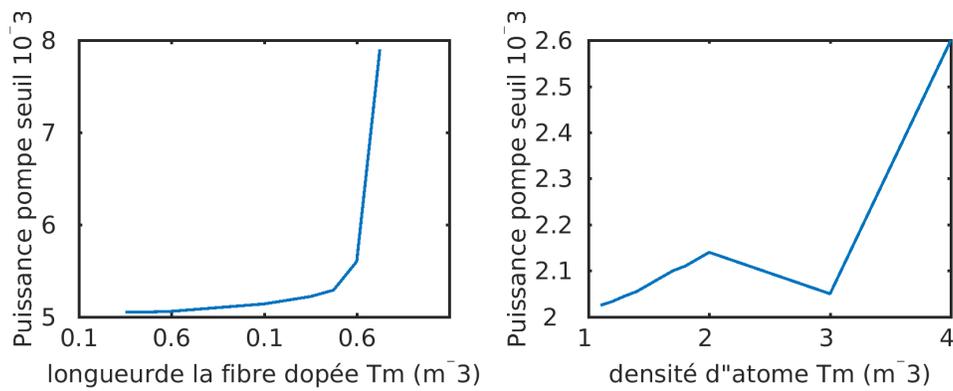


Figure 2.6: variation de la puissance pompe seuil en fonction de L_s et N_{T_m}

2.5.1.2 Dynamique du Laser

Dans cette partie, nous allons étudier la dynamique du laser en variant la puissance de pompe (P) et en fixant les deux paramètres, la densité de l'absorbant saturable N_{T_m} , et le facteur de l'émission spontanée. Nous avons observé un régime impulsionnel sur les deux longueurs d'ondes pour les puissances pompes inférieure à $P=433$ W. et un régime continu pour des puissances pompes supérieur ou égal à 433 W. La figure (2.7) et la figure (2,8) illustrent le régime continu qu'on obtiens pour des puissances supérieure à 433 W.

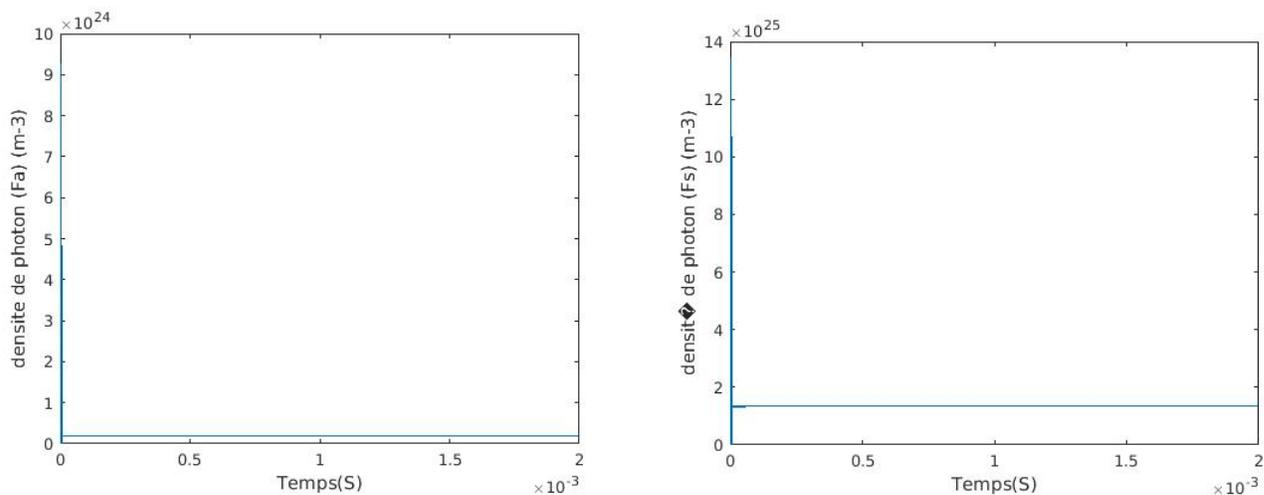


Figure 2.7: Train d’impulsion de signal de sortie laser à 1570 nm et à 1860 nm à $p > 433W$

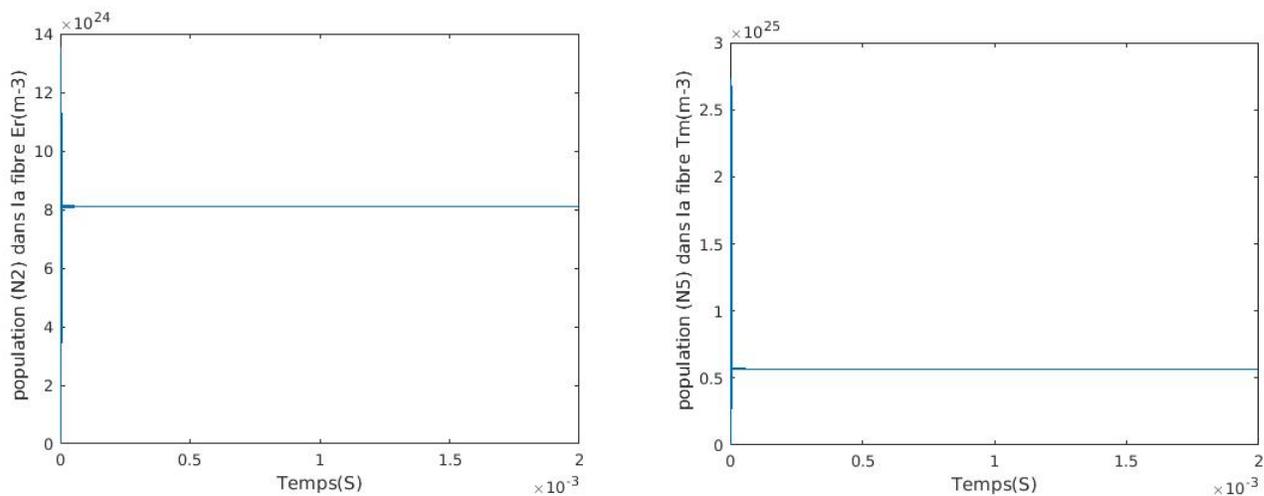


Figure 2.8: Densité de population des ions Er et Tm à $p > 433W$

2.5.2 Étude de l’influence de la densité Tm (N_{Tm}) sur le régime de fonctionnement du laser

Dans cette partie, nous étudions les différents régimes de fonctionnement du laser en faisant varier la densité des ions N_{Tm} pour une puissance pompe de $P=2W$, et on gardant les autres paramètres du laser invariants. On constate des simulations que le fonctionnement en impulsions du laser se produit pour une densité N_{Tm} appartenant à cette plage $[6 \times 10^{24}, 3 \times 10^{25}] m^{-3}$, si non on n’observe pas un fonctionnement en impulsions

du laser. En effet, pour une densité N_{Tm} inférieure à 6×10^{24} , les pertes de l'absorbant saturable sont faibles pour empêcher l'oscillation laser, et donc ce dernier fonctionne en régime continu. Par contre, pour une densité N_{Tm} supérieure à 3×10^{25} , les pertes de l'absorbant saturable sont très élevées, et donc l'absorbant saturable ne se sature jamais ce qui empêche le fonctionnement du laser.

Les figures (2.9) et (2.10) montrent le comportement du laser pour une densité N_{Tm} de $6 \times 10^{24} m^{-3}$.

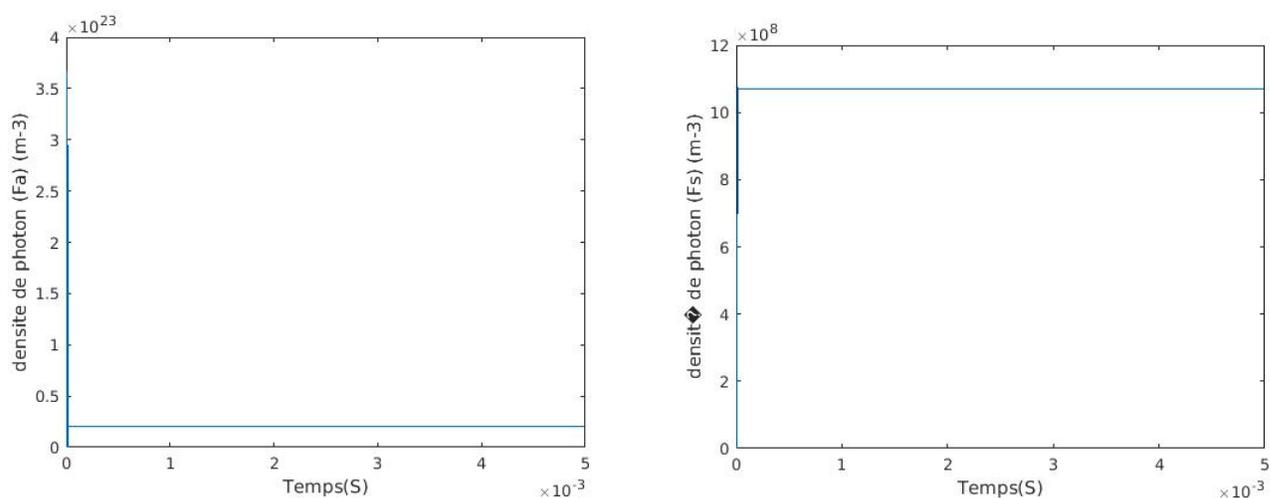


Figure 2.9: Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $N_{Tm} = 4.10^{10} m^{-3}$

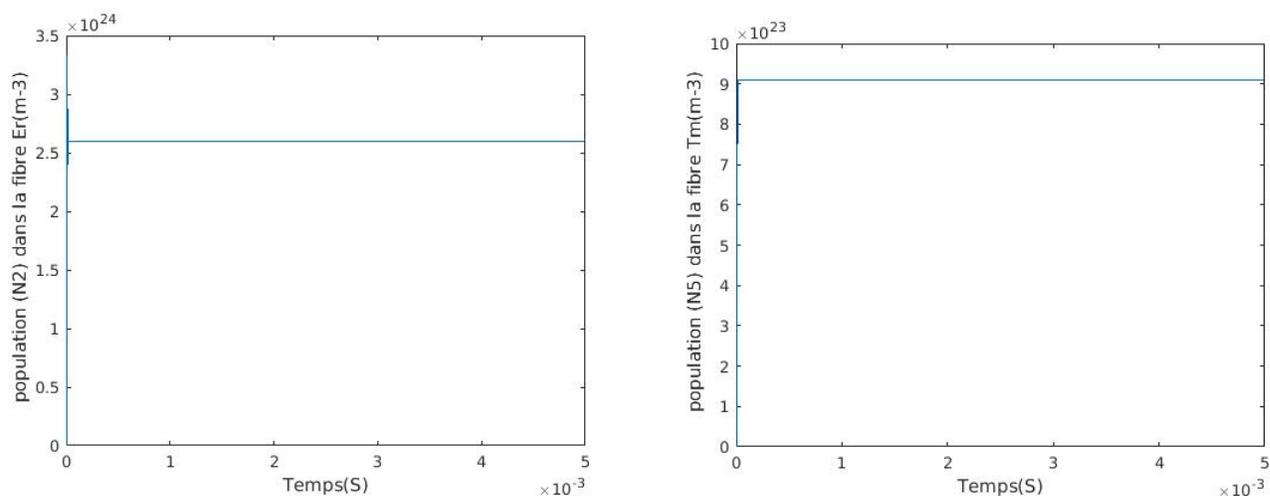


Figure 2.10: Densité de population des ions Er et Tm à $N_{Tm} = 4.10^{10} m^{-3}$

les figure (2.11) et (2.12) présentent le du laser à $N_{Tm} \gg 3 \times 10^{25} m^{-3}$. on voit bien que l'émission laser est bloquée pour une densité des atome N_{Tm} grande

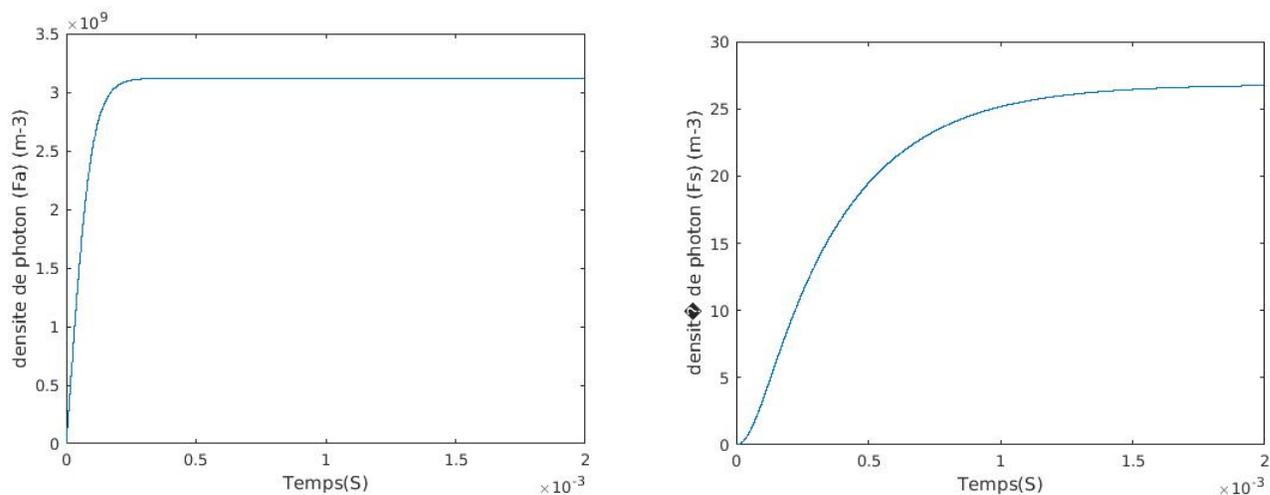


Figure 2.11: Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $N_{Tm} = 5.10^{25}m^{-3}$

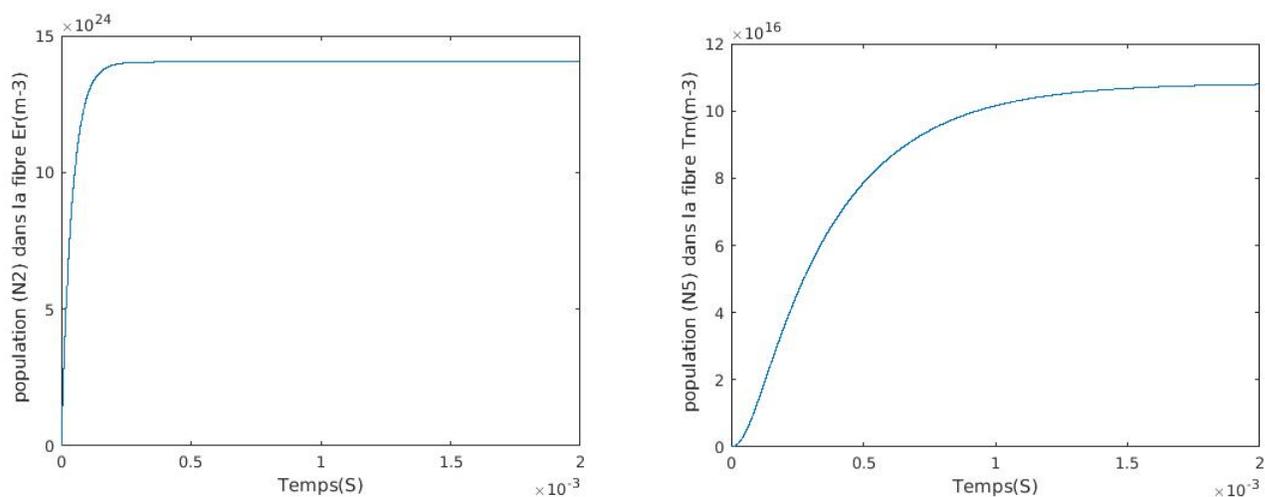


Figure 2.12: Densité de population des ions Er et Tm à $N_{Tm} = 5.10^{25}m^{-3}$

2.5.3 Étude de l'influence de l'émission spontanées sur le fonctionnement du laser

Dans cette partie, on regarde l'influence du paramètre de l'émission spontanée sur le fonctionnement du laser, pour cela, on fait varier β de $10^{-30}s^{-1}$ à $10^{-7}s^{-1}$ et on fixe la puissance de pompe à $P = 2W$ et la concentration des ions $N_{Tm} = 3 \times 10^{25}m^{-3}$.

Les figures (2.13), (2.14) présentent le régime impulsionnel du laser pour $\beta = 1.10^{-7}s^{-1}$, on observe des simulations que les impulsions laser sont les mêmes pour $\beta \geq 10^{-20}s^{-1}$.

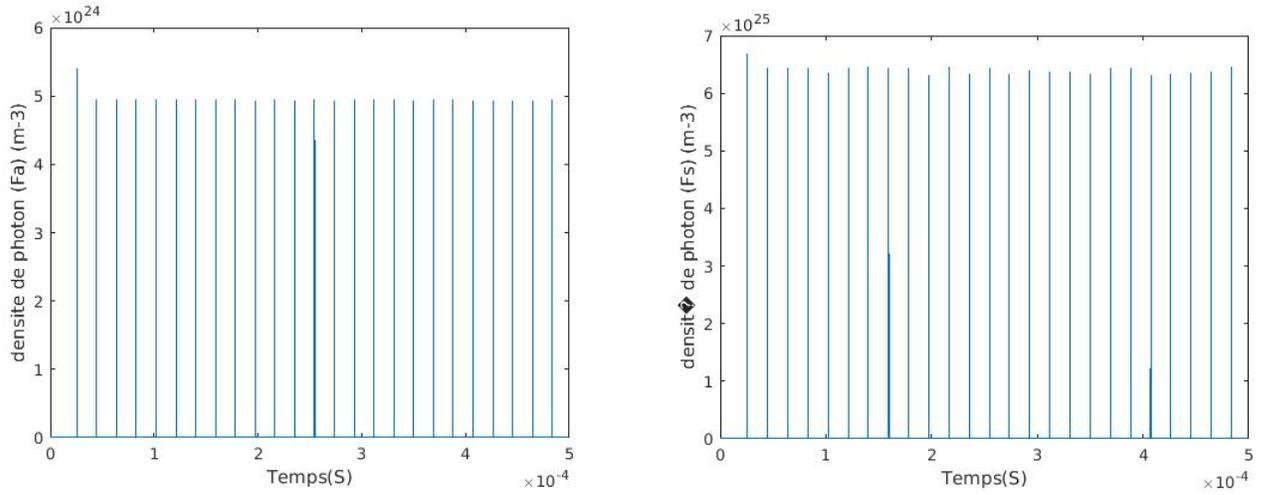


Figure 2.13: Train d'impulsion de signal de sortie laser à 1570 nm et à 1860 nm $\beta = 1.10^{-7} s^{-1}$

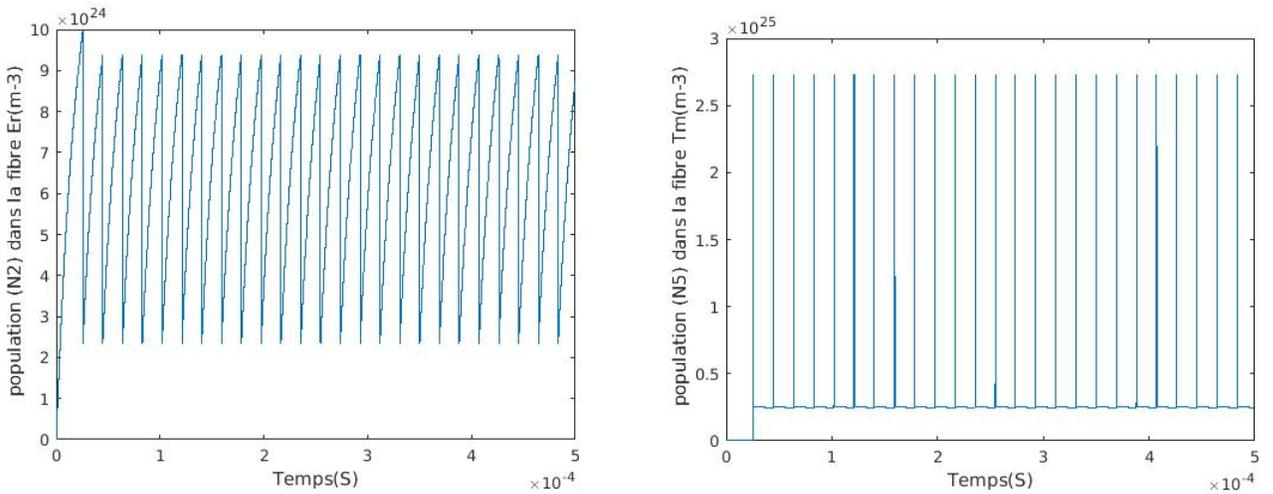


Figure 2.14: Densité de population des ions Er et Tm à $\beta = 1.10^{-7} s^{-1}$

Les simulations montrent que le laser ne fonctionne pas pour un paramètre inférieur à $10^{-24} s^{-1}$, ceci peut s'expliquer par le fait que lorsque est très faible, l'émission spontanée est tellement faible qu'elle ne peut faire démarrer le laser. Les deux figures (2.15) et (2.16) sont obtenus pour $\beta = 1.10^{-30} s^{-1}$.

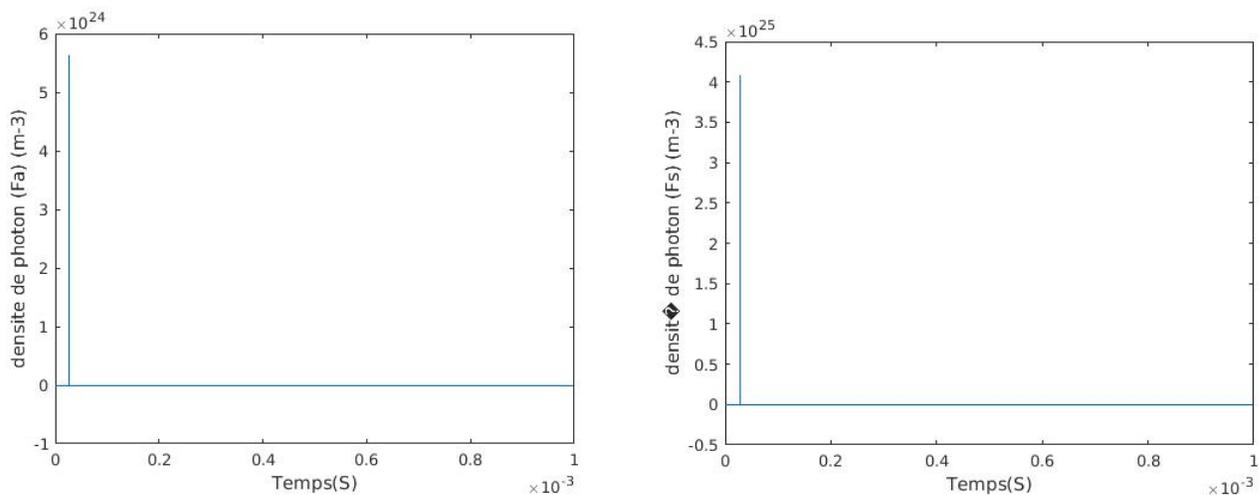


Figure 2.15: Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $\beta = 1.10^{-30} s^{-1}$

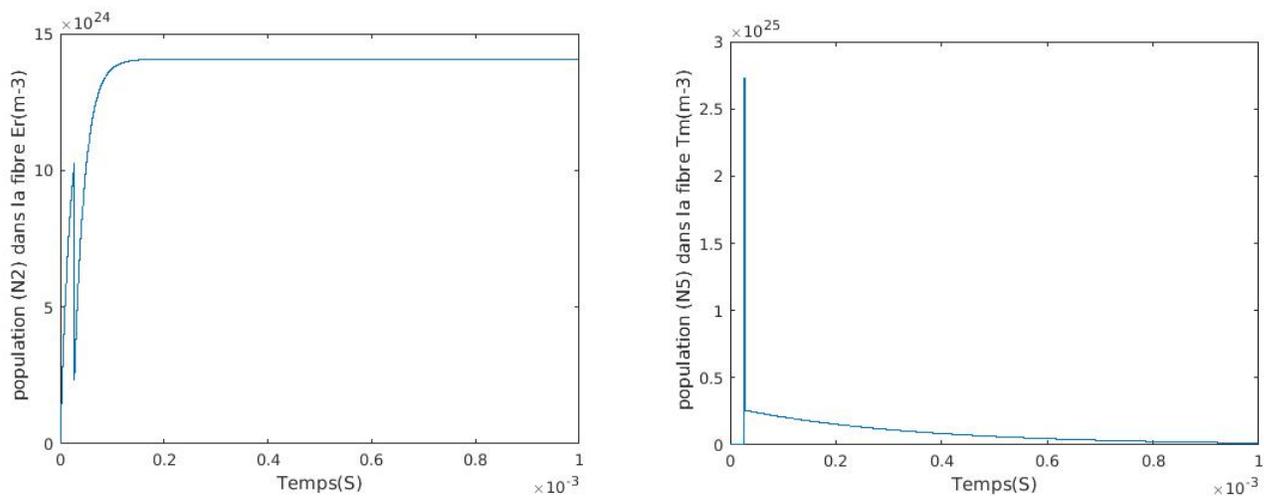


Figure 2.16: Densité de population des ions Er et Tm à $\beta = 1.10^{-30} s^{-1}$

Nous avons observé un autre régime bizarre entre les deux régimes précédents pour $\beta = 1.10^{-23} s^{-1}$, le laser fonctionne en impulsionnel sur les deux longueurs d'ondes et puis il s'arrête d'une manière soudaine. La figure (2.17) et la figure (2.18) illustrent ce régime.

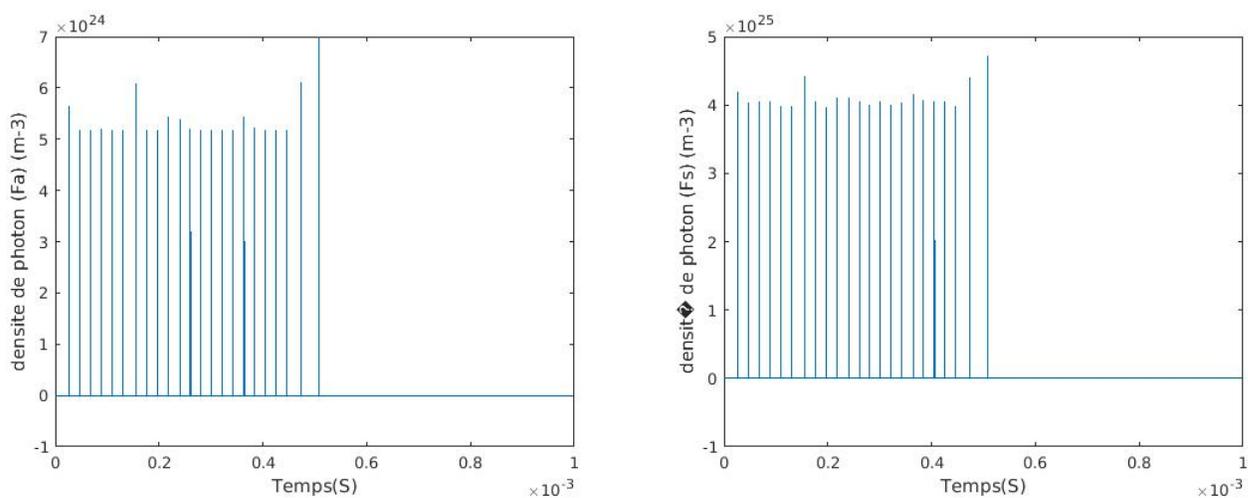


Figure 2.17: Densité de photon à 1570 nm et à 1860 nm à $\beta = 1.10^{-23} s^{-1}$

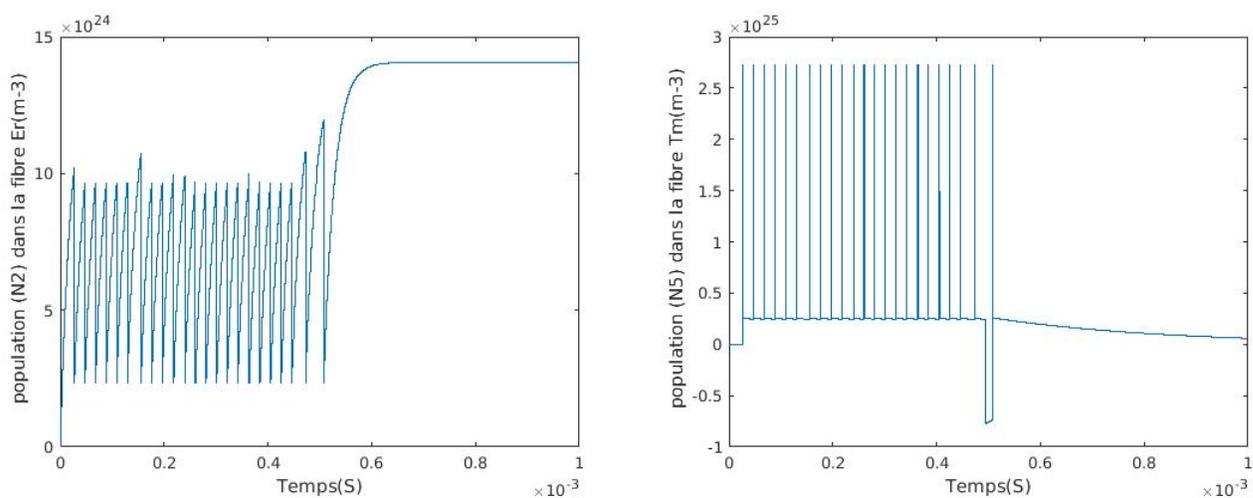


Figure 2.18: Densité de population des ions Er et Tm à $\beta = 1.10^{-23} s^{-1}$

2.6 Conclusion

La modélisation et les simulations numériques du laser passivement Q-déclenché à double cavités sont effectuées avec le modèle ponctuel. Il a été constaté que le paramètre de l'émission spontanée est un paramètre important sur le fonctionnement du laser et que nous avons observé un régime bizarre pour $\beta = 1.10^{-23} s^{-1}$, où le laser cesse de fonctionner subitement après démarrage. Nous avons aussi étudié l'influence de la puissance pompe et de la densité des ions Tm sur les différents régimes de fonctionnement du laser.

Conclusion générale

Contrairement à un laser Q-déclenché avec une seule cavité, les lasers Q-déclenchés à double cavités peuvent atteindre des grandes puissances sur les deux longueurs d'onde du laser. Nous nous sommes intéressés dans ce travail au laser passivement Q-déclenché dopée Er-Tm à deux cavités, nous avons présenté tout au long de ce travail les principaux composants de ce laser, et une présentation brève sur les mécanismes et les types du Q-déclenchement. Nous avons finalement présenté notre architecture laser tout en expliquant ces principaux composants, nous avons modélisé cette structure laser en utilisant le modèle ponctuel, notre but est d'étudier la dynamique de ce type de laser, dont le fonctionnement est régi par les quatre équations cinétiques publiés par Tao. On a observé l'existence des deux régimes de fonctionnement à savoir, un régime continu et impulsionnel. Ces régimes apparaissent avec la variation de la puissance pompe et dépendent aussi de la concentration des ions Tm. Nous avons étudié l'influence de l'émission spontanée sur le fonctionnement du laser, nous avons observé un fonctionnement bizarre du laser où ce dernier s'arrête brusquement au démarrage après quelques impulsions laser.

Bibliographie

- [1] Les LASERS et leurs application . Sébastien FORGET . Laboratoire de Physique des Lasers . Université Paris-Nord . Cours.
- [2] REDJDAL, Kaci Étude d'une Chaîne de Télécommunication Optique 2013 Mémoire de master
- [3] Réalisation par simulation d'un émetteur d'impulsions isotoniques à un débit de 40 GHz pour un système de Télécommunication optique 2020 Mémoire de master
- [4] <https://www.geo.fr/environnement/definition-terres-rares-scandium-yttrium-et-lanthanides-124433>
- [5] Aldo Giannuli, Traduit par Alice Sanna .Le marché des terres rares . Outre-Terre 2016.
- [6] <https://www.geo.fr/environnement/definition-terres-rares-scandium-yttrium-et-lanthanides-124433>
- [7] MOUSSAOUI, Nassima Modélisation et simulation d'un laser à fibre à double cavité passivement Q-déclenché et à commutation de gain dopée Er-Tm à l'aide du modèle ponctuel 2021
- [8] <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/04/refdp201021p12.pdf>
- [9] <https://fr.lambdageeks.com/population-inversion>
- [10] Anton Vos et Vincent Monnet . Le laser, 50 an
- [11] <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/04/refdp201021p12.pdf>
- [12] HENNEQUIN, D. / ZEHNLE, V. / DANGOISSE, D. Les laser
- [13] Le principe de fonctionnement des lasers <https://www.makerslide-machines.xyz/fr/2019/07/22/principe-fonctionnement-lasers>

-
- [14] DJELLOUT DJILLALI, « Modélisation et simulation d'un laser à double cavité : Entièrement fibré Passivement Q-déclenché », thèse de doctorat, 2020.
- [15] Réalisation par simulation d'un émetteur d'impulsions isotoniques à un débit de 40 GHz pour un système de Télécommunication optique 2020 Mémoire de master
- [16] Laser à fibre <https://www.aerodiode.com/fr/les-bases-des-laser-fibres/>
- [17] Tao, Mengmeng / Ye, Xisheng / Wang, Fei / Zhao, Haichuan / Wang, Zhenbao / and Guobin Feng, Pengling Yang Modeling and Analysis of a Pulsed Er-Tm Fiber Laser System 2015
- [18] <https://fr.lamdageeks.com/population-inversion>
- [19] Wilfried Blanc . Propriétés de luminescence des ions de terres rares dopés dans des nanoparticules diélectriques incorporées dans une matrice vitreuse .2015 Thèse