



UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS  
PROJET TUTEURÉ DE LICENCE DE PHYSIQUE

ANNÉE 2017

April 4, 2017

---

## Transition vers le Chaos

---

*Auteurs:*

Victor CHAPLE-TRIVERIO  
Gabriel CANDELA

*Encadrant:*

Stéphane BARLAND

Projet réalisé à *l'Institution Non Linéaire De Nice*





# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Présentation générale du sujet . . . . .	1
1.2	Cadre . . . . .	1
1.3	Problématique . . . . .	2
1.4	Plan du rapport . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Détails et caractérisation de l'expérience</b>	<b>3</b>
2.1	Caractérisation de l'expérience . . . . .	3
2.1.1	Expérience 1 : Laser Vcsel seul, dit "ESCLAVE" . . . . .	4
2.1.2	Expérience 2 : Laser ESCLAVE couplé au Laser MAÎTRE . . . . .	4
2.2	Description du matériel optique . . . . .	5
2.2.1	Le Laser : théorie semi-classique . . . . .	5
2.2.2	Instrumentations . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Dynamique du laser et dynamique chaotique dans l'espace réel et de Fourier</b>	<b>7</b>
3.1	Exp 1 : Dynamique du laser . . . . .	7
3.2	Exp 2 : Dynamique chaotique dans l'espace réel et de Fourier . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Analyse et commentaires</b>	<b>9</b>
4.1	Expérience 1 : Laser Esclave seul . . . . .	9
4.2	Expérience 2 : Laser Esclave couplé au Laser Maître . . . . .	9
4.3	Perspectives pour le site Internet . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Présentation générale du sujet

Le projet présenté nous offre l'opportunité d'étudier un système non-linéaire dans une dynamique dite *chaotique* : un laser couplé assimilable à un oscillateur forcé. Avant d'introduire la notion de chaos, il semble intéressant de faire quelques rappels fondamentaux sur les systèmes dynamiques. Un système dynamique consiste en un ensemble d'états possibles, décrit par une loi qui détermine de façon unique l'état présent du système en fonction de ses états passés. Sa dynamique peut alors soit évoluer au cours du temps, soit par rapport à une autre variable suivant l'espace des phases. Il est également possible de distinguer plusieurs catégories de systèmes dynamiques : déterministes ou stochastiques. Les premiers ont une évolution régie par des lois mathématiques bien connues, on peut donc connaître à chaque instant la position du système. Les deuxièmes évoluent dans le temps de telle sorte à ce qu'aucune prévision exacte ne soit possible. Ceux qui nous intéressent, les systèmes dit chaotiques, ont, quant à eux, un comportement infiniment plus complexe. Ils présentent entre autres une dynamique déterministe et prévisible à court terme, mais imprévisible, voir aléatoire à long terme.

Ce sujet fait ainsi appel à la théorie du chaos, ou chaos *déterministe*. Cette théorie mathématique décrit des systèmes dynamiques dont les trajectoires définies par des équations différentielles manifestent une sensibilité très forte aux conditions initiales. La théorie du chaos peut alors être utilisée afin de définir des systèmes dynamiques avec, au minimum, trois degrés de liberté. Dans notre système, ces degrés de liberté constituent la partie imaginaire et la partie réelle du champ électrique émis par le laser couplé, et enfin les populations des atomes sur les différents niveaux d'énergies dans la cavité optique du laser, en d'autre terme l'inversion de population. De plus, ce chaos à basse dimension traité au cours de projet est à différencier du chaos "*hamiltonien*", qui constitue un domaine d'étude distinct. De nos jours, la théorie du chaos réside dans de nombreux domaines (météorologie, économie, biologie, astronomie, géophysiques).

Un exemple connu de dynamique chaotique est « *l'effet papillon* », il décrit un système dont l'état final dépend des très petites variations dans l'état initial. Cette métaphore insiste sur la disproportion entre la cause et l'effet, soulignant au passage l'imprédictibilité de l'évolution à long terme de tels systèmes.

### 1.2 Cadre

Le laser, en plus d'être assimilable à un oscillateur non-linéaire, peut détenir un comportement analogue à celui d'un neurone, sous certaines conditions. Dans ce cadre, un montage a été entrepris dans le but d'analyser expérimentalement la dynamique d'un grand nombre d'éléments excitables couplés, et de démontrer un processus de mémorisation optique basé sur une forme de plasticité synaptique. En utilisant un montage annexe, ce projet nous offre l'opportunité d'observer de la transition vers le chaos dans un système non-linéaire : un laser avec forçage. Ce travail s'effectuera principalement de façon expérimentale, d'où sa nature plus *qualitative* que quantitative.

## 1.3 Problématique

Ce projet met en avant le "*chaos*", notion que l'on cherchera à étudier dans la suite du projet. La problématique soulevée peut être synthétisée par la série d'interrogations suivantes : qu'est ce que de la transition vers le chaos ? Comment se manifeste-t-elle expérimentalement dans un système dynamique assimilable à un oscillateur forcé, dans l'espace réel et de Fourier ? Plus précisément, quelles sont, dans notre système, les séquences de bifurcations menant à un régime chaotique ?

D'autre part, l'expérience utilisée au laboratoire met en jeu du matériel optique qui semble nécessaire d'analyser afin de comprendre l'ensemble de la manipulation. Comment fonctionne un laser ? Un interféromètre type Fabry-Perot ou un isolateur optique ? Qu'est ce que l'on va chercher à mesurer et par quels moyens ?

Telles sont les questions auxquelles on cherchera à répondre et qui constitueront notre fil directeur au cours du projet.

## 1.4 Plan du rapport

Les recherches bibliographiques et théoriques représentent notre travail initial du projet et permettent dans un premier temps de comprendre ce que nous faisons et avec quel matériel, en raison du cadre de travail s'inscrivant dans une forte dimension expérimentale (cf Figure 2.1). De plus, le fonctionnement d'un laser nous étant en détail inconnu, il paraît indispensable de démarrer ce projet laboratoire par une étude fondamentale sur la dynamique du laser.

Ce travail s'établira alors dans un premier temps dans un chapitre dédié à l'étude du montage expérimental, dans lequel sera développé une partie sur le fonctionnement global de la manipulation au sein du laboratoire et d'une partie théorique sur les différents composants optiques utilisés (laser, interféromètre de Fabry-Perot, etc). Puis dans un second temps, un chapitre, composé de deux parties, sera consacré à une étude sur la dynamique du laser, puis enfin à la recherche dans l'espace de Fourier d'une séquence de bifurcations menant vers le régime chaotique dans un laser avec forçage. La première partie représente notre travail liminaire expérimental du projet concernant la dynamique du laser tandis que la deuxième concerne directement la problématique soulevée. Néanmoins, celle ci n'a démarré que dernièrement. On proposera alors d'observer uniquement de façon expérimentale un régime chaotique dans un oscillateur forcé au cours de ce rapport.

Le rapport suivra ainsi la structure citée ci-dessous.

- Détails et caractérisation de la manipulation :

Cette partie s'établit en deux sections. La première s'attachera à l'étude de l'expérience, le laser avec et sans forçage, et de la propagation du faisceau incident à travers les divers constituants, tandis que la deuxième section sera dédiée à la théorie du laser en utilisant le point de vue semi-classique, ainsi qu'à la définition de notre matériel optique annexe.

- Dynamique du laser et dynamique chaotique :

Cette partie traite de la dynamique de notre système et se compose en deux sections. Tout d'abord, le laser en tant que système dynamique non-linéaire à part entière sera abordé. Puis, dans la deuxième section et après couplage unidirectionnel à l'aide d'un deuxième laser, on étudiera, selon la variation d'un paramètre de contrôle, le passage d'une dynamique linéaire à non linéaire, stable à instable, ordonné à désordonné, voir chaotique, dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier.

- Analyse et commentaire :

Cette partie nous permettra d'analyser les observations faites expérimentalement. De plus, on établira le lien entre ce qui est détaillé dans le rapport et ce qui sera présenté dans le site internet. En effet, en raison de la limitation du nombre de pages de ce rapport, certains points ne seront pas détaillés.

- Conclusion et perspectives :

Il s'agira de conclure sur l'avancement du sujet proposé à ce jour ainsi que d'apporter des ouvertures et des perspectives d'étude et de recherche au cours des semaines à venir.

## Chapitre 2

# Détails et caractérisation de l'expérience

Dans ce chapitre, nous allons établir un travail préliminaire nécessaire avant de pouvoir développer la notion de chaos : l'étude du système, qui se fera en deux niveaux. Nous proposons alors de définir notre système dynamique qui sera initialement un laser unique type Vcsel (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) présent sur une table optique sur laquelle est disposée avec grande précision divers matériels optiques, puis ce laser sera par la suite couplé à un deuxième laser, dit accordable. Dans cette dernière partie, comme nous allons le voir, est observable de la transition vers le chaos. Les principes de base d'un laser seront également introduits, ainsi que le fonctionnement des divers composants optiques.

### 2.1 Caractérisation de l'expérience

La manipulation se présente en deux étapes : la première constituée d'un laser Vcsel seul, et la deuxième composée de ce même laser couplé à un autre laser dit accordable. On utilisera un jargon pour différencier ces deux lasers : le laser Vcsel sera appelé laser "ESCLAVE", le laser accordable sera nommé laser "MAÎTRE". Une explication du montage rendra ce jargon plus accessible et adapté à la dynamique du système.

La photo ci-contre nous permet de visualiser notre expérience. On peut y voir divers composants disposés sur une table optique. Il s'agit de la manipulation préliminaire du projet mettant en jeu le laser Vcsel seul placé sur la gauche dans la photo. Le faisceau lumineux généré va alors traverser plusieurs composants optiques comme une lentille, des lames à quart ou demi-onde, des séparatrices, un isolateur optique ou un interféromètre de Fabry-Perot (celui-ci n'est pas visible sur la photo et se dispose sur la droite dans la photo). On désigne alors ici le premier montage mettant en jeu la dynamique intrinsèque du laser, à l'aide d'un photo-détecteur, le boîtier en gris clair sur la photo, et d'un voltmètre, non représenté ici, et relié à l'extrémité du câble du photo-détecteur.



Figure 2.1: Photo du montage expérimental, Expérience 1

Le rôle et le fonctionnement de ces divers constituants seront détaillés dans la partie "INSTRUMENTATIONS".

### 2.1.1 Expérience 1 : Laser Vcsel seul, dit "ESCLAVE"

Nous allons tout d'abord étudier la réponse du laser Vcsel, dit "ESCLAVE" utilisé sans couplage selon la variation d'un paramètre de contrôle. En premier lieu, le faisceau incident rencontre une lentille afin de focaliser vers un objet lointain, puis, une lame semi-réfléchissante : la partie réfléchie est ainsi dirigée vers un photo-détecteur, branché directement sur un voltmètre, l'autre partie du faisceau prend quand à lui un autre chemin qui nous sera utile pour l'étude de la transition vers le chaos. Ce faisceau transmis par la lame séparatrice traverse alors un isolateur optique, puis un cube polariseur (PBS). Ce dispositif sépare l'onde incidente dans une polarisation donnée en deux ondes de polarisations et de directions différentes. Une des deux polarisations sera alors envoyée dans le Fabry-Perot, qui nous sert entre autre de filtre spectral, puis atteindra l'oscilloscope 2. L'autre partie sera redirigée directement dans l'oscilloscope 1 à l'aide de miroirs totalement réfléchissants. À la place des oscilloscopes 1 et 2 seront placés en réalité des photo-détecteurs de sensibilité différente, détecteurs eux-mêmes reliés à des oscilloscopes de résolution différente également.

*But:* Étudier la réponse du laser, c'est à dire l'intensité du champ électrique émis, à l'aide d'un photo-détecteur en fonction de l'intensité du courant électrique délivré.

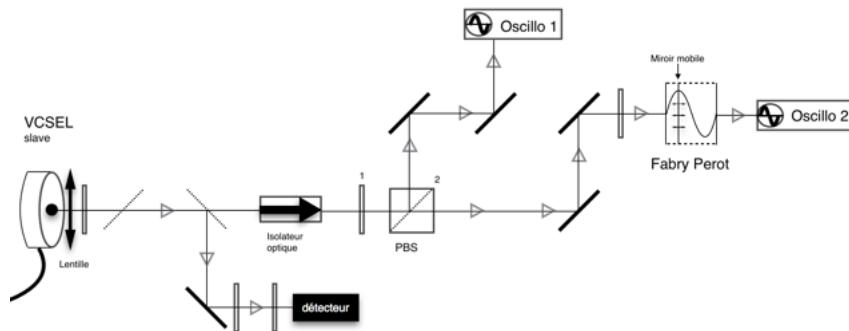


Figure 2.2: Schéma expérimental - Caractérisation du Laser "ESCLAVE" seul

### 2.1.2 Expérience 2 : Laser ESCLAVE couplé au Laser MAÎTRE

Dans cette expérience, la seule différence est l'ajout d'un laser. Ce laser accordable dit "MAÎTRE" vient d'une part perturber le laser Vcsel dit "ESCLAVE", qui subira alors le forçage, puis d'autre part viendra suivre le chemin défini dans l'expérience 1. Autrement dit, le laser esclave subit le couplage du laser maître. Ce couplage s'effectue au niveau d'une lame semi-réfléchissante disposée de sorte que le faisceau incident du laser maître atteigne le milieu amplificateur du laser esclave. Notre système, du point de vue du laser esclave, devient alors assimilable à un oscillateur non-linéaire forcé qui peut, sous certaines conditions, détenir une dynamique dite *chaotique*. En effet, l'effet Joule induit par une augmentation d'intensité dans le milieu amplificateur du laser esclave entraîne une dilatation de la cavité optique et modifie ainsi ces modes de résonances. Ce paramètre nous permet ainsi de contrôler la fréquence d'oscillation du laser esclave. En pratique, on viendra se placer dans le référentiel du laser maître à fréquence fixée puis on modifiera sensiblement la fréquence d'oscillation du laser esclave autour de la fréquence d'oscillation du laser maître. Notre paramètre de contrôle reste l'intensité du courant du laser esclave.

*But:* Étudier de la transition vers le chaos d'un laser couplé assimilable à un oscillateur forcé dans l'espace réel et de Fourier en fonction de la fréquence d'oscillation du laser esclave.

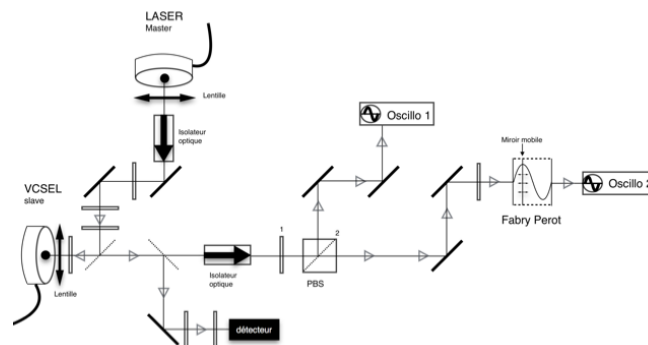


Figure 2.3: Schéma expérimental - Observation du chaos dans un laser "ESCLAVE" forcé par le laser "MAÎTRE"



## 2.2 Description du matériel optique

Dans un premier temps, un point sera dédié à une étude plus approfondie à propos de l'élément principal de notre système : le laser. On propose ainsi d'étudier son principe de fonctionnement du point de vue semi-classique. Puis, dans un second temps, nous ferons une brève description des divers constituants optiques présents dans notre expérience.

### 2.2.1 Le Laser : théorie semi-classique

Cette section nous permet de décrire phénoménologiquement les mécanismes impliqués dans le fonctionnement du laser en adoptant le point de vue semi-classique. Les niveaux d'énergies accessibles par les atomes seront alors quantifiés, contrairement au champ électrique qui sera, quant à lui, traité comme une variable continue. Les trois mécanismes d'interactions mis en jeu dans le laser sont alors : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. [7]

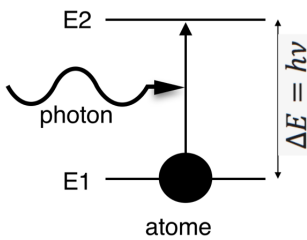


Figure 2.4: Absorption

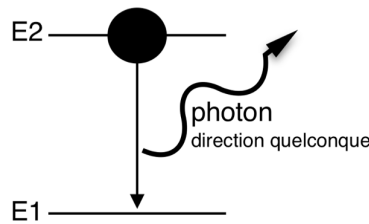


Figure 2.5: Émission spontanée

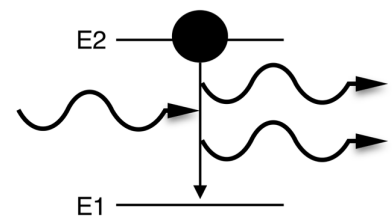


Figure 2.6: Émission stimulée

On définit tout d'abord l'absorption comme le passage d'un atome initialement dans son état fondamental  $E_1$  à un état excité  $E_2$  par effet d'absorption d'un photon d'énergie  $h\nu$ , tel que  $h\nu = E_2 - E_1$  avec  $E_2 > E_1$ , les deux niveaux d'énergies accessibles par l'atome. L'émission spontanée définit quant à lui le phénomène suivant: un atome initialement dans l'état excité  $E_2$  peut se désexciter spontanément vers l'état fondamental  $E_1$  et simultanément émettre un photon d'énergie  $h\nu$  si la transition entre les deux niveaux est radiative, c'est à dire que si la transition entre les deux niveaux d'énergies ne puisse se faire que par interaction avec la lumière. De plus, ce photon a une direction et une phase quelconque. Et enfin, l'émission stimulée décrit le passage d'un atome dans un état excité  $E_2$  à son état fondamental  $E_1$  par l'action d'un photon incident. L'atome émet alors un photon dit "stimulé" possédant la même direction, phase, énergie et polarisation que le photon incident.

L'amplification lumineuse dépend alors de l'émission stimulée. Pour appréhender au mieux ce phénomène, il faut introduire les interactions entre la lumière et la matière. La matière ici est un milieu optiquement actif placé dans un semi-conducteur. Pour une transition radiative, les trois mécanismes sont toujours présents en même temps. Il faut donc trouver un moyen privilégier l'émission stimulée, phénomène qui nous intéresse pour produire l'effet laser. L'absorption et l'émission stimulée sont deux processus réciproques soumis aux mêmes probabilités. Pour privilégier l'émission stimulée au détriment de l'absorption, la solution est de jouer sur les populations des différents niveaux : il faut parvenir à avoir plus d'atomes dans l'état excité que dans l'état fondamental, en d'autre terme, à l'état d'*inversion de populations*.

Toutefois, la situation d'avoir une population plus élevée dans l'état excité  $N_2$  que dans l'état fondamental  $N_1$  n'est pas une situation d'équilibre thermodynamique. La répartition des populations sur les niveaux est donnée par la loi de Boltzmann : [6]

$$N_1 = N_2 \times \exp \frac{E_2 - E_1}{k_b T} \quad (2.1)$$

Dans ce cas,  $N_2$  est toujours inférieur à  $N_1$ . Pour créer l'effet laser, c'est à dire parvenir à la condition  $N_2 > N_1$ , il faut établir une situation hors équilibre en apportant de l'énergie au système via un pompage dont l'objectif est d'amener suffisamment d'atomes dans l'état excité. Le pompage dans notre cas se fera par voie électrique. Qu'importe la nature du pompage, il doit correspondre à l'énergie nécessaire au milieu  $h\nu$  pour induire au moins une émission stimulée. Ce critère implique l'existence d'une énergie seuil correspondant à l'inversion de population. Cette énergie doit être suffisante pour que l'amplification compense les pertes afin que l'effet laser se produise. Par conséquent, on peut émettre l'hypothèse que laser en fonctionnement soit théoriquement un système hors équilibre dissipatif à transition seuil. Le premier montage (Figure 2.2) est alors prévu afin de vérifier cette hypothèse.

Un autre mécanisme essentiel au laser est la cavité optique [4]. Elle est constituée d'un résonateur type Fabry-Perot de longueur proportionnelle à la longueur d'onde d'émission. En pratique, deux miroirs de Bragg permettent de confiner les photons « stimulés », la lumière effectue de multiples allers-retours et provoque ainsi l'amplification du phénomène d'émission spontanée. La lumière réfléchi plusieurs fois peut alors interférer avec elle-même, ce qui implique que seules quelques longueurs d'onde peuvent être présentes dans la cavité. Ces ondes sont donc liées aux modes de résonance de la cavité. Le faisceau laser, engendré par les pertes constantes au sein de la cavité pour un pompage fixé, est finalement transmis par l'un des miroirs partiellement réfléchissant.

On définit alors les longueurs d'onde de résonances présents dans le laser comme :  $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ , avec  $n$  un entier positif et  $L$  la longueur de la cavité.

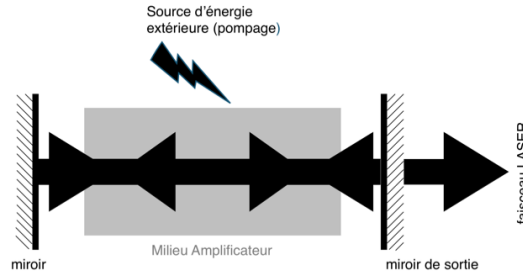


Figure 2.7: Schéma représentatif principe fonctionnement d'un laser

## 2.2.2 Instrumentations

Nous proposons au cours de cette partie une brève description du matériel optique annexe utilisé.

### - Laser type Vcsel :

Ce laser est un laser de type semi-conducteur monochromatique à faible largeur de bande, réalisé par hétéro-épitaxie et émettant dans la gamme des infrarouges :  $\lambda = 980 \text{ nm}$ . Il possède un angle de divergence plus faible qu'un laser conventionnel émettant par sa tranche.

### - Interféromètre Fabry-perot :

Le Fabry-Perot est formé de deux miroirs partiellement réfléchissants, installés parallèlement l'un par rapport à l'autre. L'un des miroirs est fixé sur des céramiques piézoélectriques, ce montage permet la variation de la distance  $d$  entre les miroirs en y appliquant une tension électrique périodique en rampe. A une distance  $d$  fixée, le Fabry-Perot ne peut transmettre que des ondes dont le champ électrique est nul aux extrémités de la cavité. Cette interféromètre nous sert alors ici de filtre spectral, avec une résolution excellente, en balayant les fréquences du signal incident. Il effectue entre autre de manière optique la transformée de Fourier du signal électrique incident et de manière quantitative le produit scalaire des multiples du mode propre de l'interféromètre avec le champ incident. À la résonance, le champ électrique est transmis pour atteindre finalement un photo-détecteur, signal que l'on va ensuite visualiser à l'aide d'un oscilloscope. On voit alors à l'écran la représentation du signal transmis dans ce que l'on pourra appelé l'espace de Fourier.

### - Isolateur optique :

L'isolateur optique est un composant en optique analogue à la diode électrique pour les circuits. Il a un double but dans notre manipulation : il sert entre autre à éviter les dommages par rétro-réflexion et à isoler de façon optique une partie de notre système. Par exemple, le laser maître ne va pas être perturbé par aucun rayon incident ou réfléchi. La partie principale d'un isolateur est le rotateur de Faraday, inséré entre deux prismes de Glan Taylor. [1]

### - Matériel annexe :

La lame demi-onde placée en sortie de l'isolateur optique sur le schéma sert à quantifier l'intensité du faisceau envoyé dans l'oscilloscope 1 et dans le Fabry-Perot, à l'aide du cube séparateur (PBS pour "polarization beam splitter"). De plus, les détecteurs utilisés convertissent le signal optique en tension. Ils mesurent l'intensité, ou amplitude au carré du champ reçu, sur leurs surfaces photo-sensibles. Concernant le reste du matériel optique sur le schéma (polariseur, lame quart-d'onde), nous les considérons comme étant transparent pour le moment.

## Chapitre 3

# Dynamique du laser et dynamique chaotique dans l'espace réel et de Fourier

Ce chapitre établira les résultats expérimentaux effectués au cours de ce projet. Tout d'abord, nous allons étudier la réponse du laser esclave, utilisé seul, en fonction de l'intensité du courant électrique délivrée (cf Expérience 1). Et enfin, nous observerons de la transition vers le chaos dans un laser couplé unidirectionnellement assimilable à un oscillateur forcé, dans l'espace réel et de Fourier (cf Expérience 2). Les résultats .txt des mesures seront disponibles sur le site internet.

*Matériel* : Les mesures ont été faites, dans l'expérience 1, à l'aide d'un détecteur photo-sensible relié à un voltmètre ainsi que d'un oscilloscope; tandis que dans l'expérience 2, nous nous sommes servis de deux détecteurs photo-sensibles et de deux oscilloscopes de résolutions différentes. Leurs usages ont des objectifs différents. L'oscilloscope à la sortie du Fabry-Perot nous permet ainsi de visualiser le signal incident dans l'espace de Fourier, tandis que le deuxième nous sert à le voir dans l'espace réel.

### 3.1 Exp 1 : Dynamique du laser

Cette partie se réfère à la Figure 2.2. Nous modifions manuellement l'intensité du courant électrique apportée au laser esclave seul, de 0 à 1 mA, et nous observons sa réponse sur le voltmètre branché au photo-détecteur. On mesure entre autre l'intensité du champ électrique émise par le laser. Une série de mesures plus détaillée a été établie autour de  $220 \mu\text{A}$ , point critique de notre mesure. Le photo-détecteur lors de la rencontre avec un signal optique induit une différence de potentiel visible par le voltmètre. La tension aux bornes du détecteur croît alors de la même façon que l'intensité du champ électrique incident.

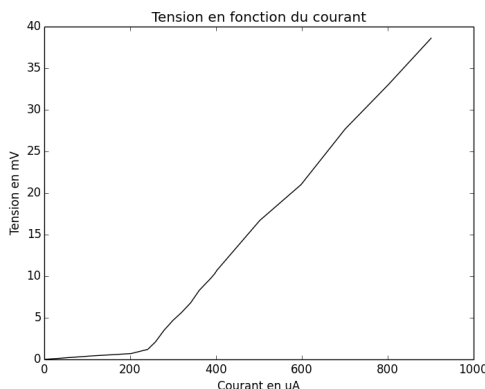


Figure 3.1: Réponse du laser seul en fonction de l'intensité apporté

On distingue dans la Figure 3.1 deux régions distinctes : une première de 0 à environ  $220 \mu\text{A}$  dans laquelle la tension affichée sur le voltmètre est nulle, et par conséquent l'intensité du champ électrique incident l'est également; et une deuxième, d'environ  $220 \mu\text{A}$  à 1 mA, dans laquelle la tension, et donc l'intensité du champ, croît linéairement. Il semble alors exister un courant minimal  $i_{min}$  au voisinage de  $220 \mu\text{A}$  nécessaire avant l'observation de l'effet laser.

On propose également d'observer dans l'espace de Fourier l'intensité du champ électrique émis par le laser esclave sans perturbation.

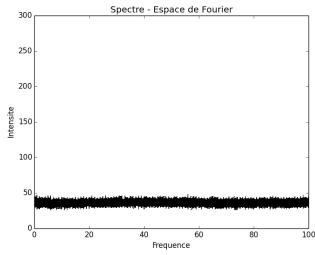


Figure 3.2: Spectre du laser seul  $i = 200 \mu A$

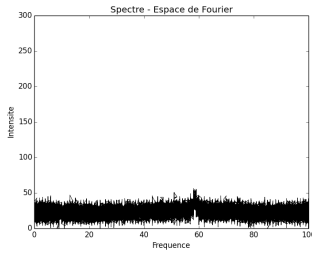


Figure 3.3: Spectre du laser seul  $i = 220 \mu A$

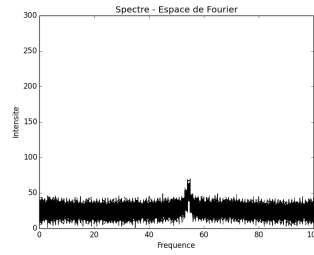


Figure 3.4: Spectre du laser seul  $i = 225 \mu A$

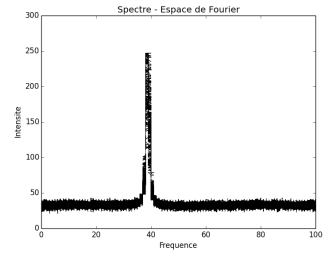


Figure 3.5: Spectre du laser seul  $i = 1 \text{ mA}$

Dans la première région, de 0 à environ  $220 \mu A$ , l'oscilloscope ne détecte rien hormis du bruit ambiant. A partir de  $220 \mu A$ , un léger pic se distingue du bruit. Puis au delà de  $225 \mu A$ , on observe toujours la présence d'un pic unique et net d'intensité variable selon l'intensité apportée au laser. De plus, ce pic ne s'élargit pas.

### 3.2 Exp 2 : Dynamique chaotique dans l'espace réel et de Fourier

Cette partie se réfère à la Figure 2.3. Dans ce cas, le laser esclave est assimilable à un oscillateur forcé, qui peut détenir sous certaines conditions une dynamique dite chaotique. Nous proposons de relever une séquence de bifurcations menant à un régime chaotique. En pratique, on se placera dans le référentiel du laser maître, auquel on fixera l'intensité du courant électrique délivrée, et donc par extension l'intensité lumineuse fournie ainsi que sa fréquence d'oscillation. Notre paramètre de contrôle reste alors l'intensité du courant électrique apportée au laser esclave de telle sorte à ce qu'on balaie ses différentes fréquences d'oscillation au voisinage de la fréquence d'oscillation du laser maître. On observe ainsi expérimentalement la dynamique résultante dans l'espace réel et de Fourier selon les paramètres initiaux. On fixe alors  $i_{maître} = 150,41 \text{ mA}$  et on surveille à chaque série de mesures si cette valeur ne fluctue pas. On fait varier finement l'intensité via l'offset de l'oscilloscope.

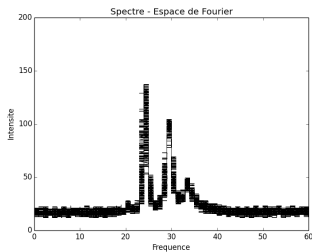


Figure 3.6: Spectre du laser couplé  $i = 761 \mu A$

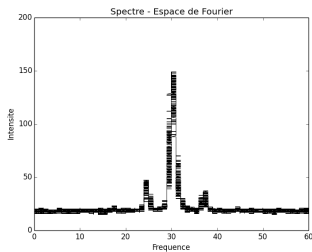


Figure 3.7: Spectre du laser couplé  $i = 808 \mu A$

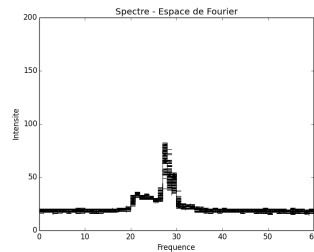


Figure 3.8: Spectre du laser couplé  $i = 833 \mu A$

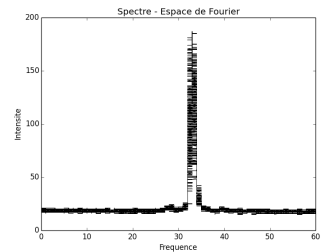


Figure 3.9: Spectre du laser couplé  $i = 836 \mu A$

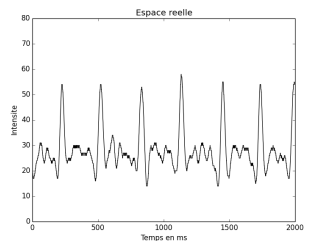


Figure 3.10: Espace réel laser couplé  $i = 761 \mu A$

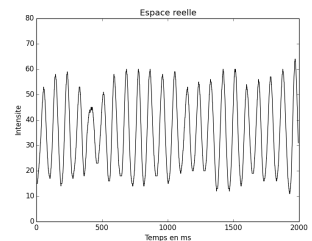


Figure 3.11: Espace réel laser couplé  $i = 808 \mu A$

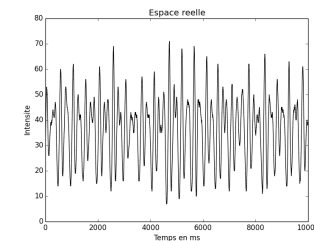


Figure 3.12: Espace réel laser couplé  $i = 833 \mu A$

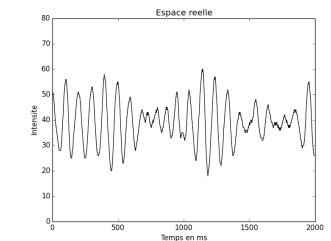


Figure 3.13: Espace réel laser couplé  $i = 836 \mu A$

Nous observons un signal dont les représentations expérimentales dans l'espace réel et de Fourier sont a priori complexes et peu communes. Il en émerge une dynamique qui semble être entièrement définie par un désordre global ou par des effets stochastiques imprédictibles. On note toutefois une dynamique d'accrochage, une stabilité, dans l'espace de Fourier dans la Figure 3.13.

# Chapitre 4

## Analyse et commentaires

Ce chapitre s'établit en une discussion critique des résultats expérimentaux obtenus jusqu'à présent, il établit également le lien entre les points traités dans le rapport et le contenu du site internet.

### 4.1 Expérience 1 : Laser Esclave seul

La manipulation préliminaire nous a apporté des résultats satisfaisants la théorie. En effet, la Figure 3.1 met en évidence une bifurcation dite *transcritique* du point de vue de l'intensité du champ électrique. On passe successivement d'un point fixe à un autre, au voisinage de  $i_{min}$ . De plus, l'intensité, correspondant à l'amplitude au carré du champ électrique, croît linéairement. Par conséquent, l'amplitude du champ croît en racine carrée à partir d'une intensité électrique  $i_{min}$ , proche de  $220 \mu A$ . On observe alors cette fois-ci une bifurcation dite de *Hopf* du point de vue du champ électrique, qui oscille à grande vitesse et de façon cohérente une fois cette valeur seuil dépassée. La transition observée souligne un courant minimal  $i_{min}$ , et donc une énergie minimale seuil à transmettre à la cavité optique afin de parvenir à l'effet laser. L'inversion de population a ainsi une dynamique lié à celle du champ électrique. Par ailleurs dans les Figures 3.3 à 3.5, nous pouvons souligner le spectre discret pour un laser seul, assimilable alors à une fréquence simple à faible largeur de bande, témoignant de la périodicité du signal incident. Nous pouvons finalement conclure sur cette première expérience en affirmant que laser est bien un oscillateur non-linéaire.

### 4.2 Expérience 2 : Laser Esclave couplé au Laser Maître

On propose de commenter l'étude expérimentale de la transition vers le chaos. L'observation de la dynamique d'un oscillateur couplé dans l'espace réel et de Fourier ne semble répondre à aucune description déterministe triviale. En effet, lorsqu'on modifie linéairement l'intensité du courant délivrée à l'esclave, sa réponse elle ne l'est pas. La dynamique obtenue à chaque mesure n'est pas non plus stochastique, contrairement au bruit ambiant qui est lui un phénomène purement stochastique, car on arrive toutefois à retrouver un motif, une périodicité au signal. Prenons par exemple les Figures 3.6, 3.7, 3.10 et 3.11, nous avons la présence de trois pics d'intensité variable dans l'espace de Fourier et d'oscillations quasi-périodiques d'amplitude variable dans l'espace réel. Le signal résultant est alors constitué de la somme des signaux périodiques, interférant et définissant finalement une évolution qui semble quasi-périodique. La Figures 3.9 fait ressortir une situation d'accrochage, correspondant à un point fixe. Et enfin la Figure 3.8 présente les deux critères expérimentaux quant à la reconnaissance de la transition vers le chaos : un spectre continu dans l'espace de Fourier et un signal apériodique dans l'espace réel.

### 4.3 Perspectives pour le site Internet

Le site internet constituera le support final du travail effectué au cours de ce projet laboratoire. Il permettra entre autre de parcourir le sujet d'une façon plus détaillée qu'au cours de ce rapport et d'introduire des notions en ce jour pas encore établies. Au vu de l'avancement du projet, nous pouvons déjà proposer les différents points présentés par notre futur site. Concernant la première expérience, on définira de manière complémentaire le laser Vcsel, l'isolateur optique, le piège de Faraday et l'interféromètre de Fabry-Perot, [2]. On proposera également d'établir un modèle type Lotka-Volterra [3] décrivant la bifurcation transcritique observée du point de vue de l'intensité. Pour la deuxième expérience, nous allons étudier plus rigoureusement de la transition vers le chaos. Ce travail associé sera incontestablement le plus riche. On définira alors le cadre d'étude dynamique complet nécessaire quant à l'observation et l'analyse de la transition vers le chaos. [5]

# Chapitre 5

## Conclusion

Dans un premier temps, ce projet laboratoire nous a permis d'étudier la dynamique intrinsèque du laser et de définir le cadre expérimental. Puis dans un second temps, il nous a été proposé d'observer de la transition vers le chaos dans laser avec forçage assimilable du point de vue dynamique à un oscillateur non-linéaire avec couplage.

Nous avons alors démontré expérimentalement qu'avec seulement trois degrés de liberté, il était possible d'étudier une dynamique dite chaotique. Cette notion de chaos à basses dimensions reste fondamentale dans notre projet. Ainsi, nous sommes parvenus à reconnaître de la transition vers le chaos étant donnée qu'elle s'exprime expérimentalement lorsque la continuité du spectre dans l'espace de Fourier est établie et lorsque simultanément la non-périodicité du signal dans l'espace réel est avérée. Le chaos, en d'autres termes, peut être défini par une divergence exponentielle des trajectoires du système au cours du temps selon les conditions initiales. Si le modèle est reproductible alors le modèle est déterministe. Une autre définition de la dynamique chaotique serait l'évolution imprévisible à long terme de tel système, tant bien même qu'il soit déterministe.

On proposera par la suite d'étudier les séquences de bifurcations menant au régime chaotique, c'est à dire l'étude des différents scénarios possibles, expérimentalement et peut-être numériquement. On regardera entre autre l'influence réelle des conditions initiales sur l'état final de notre système. On s'attachera également à quantifier dans l'espace réel la complexité de l'attracteur : notion que l'on tâchera de définir rigoureusement. Nous nous servirons également, dans la description de la dynamique de notre système, des exposants de Lyapunov, qui, brièvement, permettent de quantifier la stabilité ou l'instabilité des mouvements. Nous étudierons pour finir de la transition vers le chaos par intermittence et par doublement de période.

## Remerciements

Les travaux présentés au cours de rapport ont été effectués à l'Institut de Physique de Nice sur le site de Sophia-Antipolis. Nous adressons ainsi nos profonds remerciements à cette nouvelle unité et à l'ensemble des chercheurs, doctorants ou stagiaires travaillant au sein de ces locaux pour leur accueil et leur ouverture à échanger avec nous, étudiants.

Nous exprimons principalement notre profonde gratitude à Monsieur BARLAND Stéphane qui nous a honoré en acceptant de nous encadrer au cours de ce projet laboratoire tuteuré. Nous saluons sa rigueur, son sens du détail mais également sa richesse d'expression lors de nos échanges pour divers éclaircissements. Nous nous tardons de poursuivre ce projet de façon plus approfondie au cours du mois de mai au sein de son équipe.

Nos remerciements les plus sincères vont à Monsieur LEGOFF Guillaume, stagiaire en Master Optique, pour ces conseils avisés ainsi que pour son temps consacré à nous aider quant à la compréhension de notre manipulation.

# Références

- [1] Isolateur optique. <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Isolateur\\_\(optique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Isolateur_(optique))>. [Online; accessed 04-April-2017].
- [2] Piège de faraday. <<http://www.lasercomponents.com/fr/produit/isolateurs-de-faraday/>>. [Online; accessed 04-April-2017].
- [3] Julien Baglio. Physique non-linéaire. <<https://www.normalesup.org/~baglio/physique/CoursNL.pdf>>, 2007. [Online; accessed 04-April-2017].
- [4] François Balembois. Laser : les fondamentaux. <[http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M01\\_C01/co/OPI\\_fr\\_M01\\_C01\\_web.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/OPI_fr_M01_C01_web.html)>, 2007. [Online; accessed 04-April-2017].
- [5] Marc Lefranc. Caractérisation topologique et contrôle du chaos. <<http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/imagephys97/53-60.pdf>>. [Online; accessed 04-April-2017].
- [6] Luigi Lugiato. *Nonlinear Optical Systems*. Cambridge, 2015.
- [7] P. Martinez. Les sources lumineuses : le laser, 2016-2017. Cours Université de Nice.