



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences exactes et
sciences de la nature et de la vie
Département de Sciences de la matière

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences de la matière

Physique

Physique des matériaux

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

houhou maroua

Contributions aux Processus physiques des populations pour améliorerle rendement des lasers G.D.L (GAS Dynamics Laser)

Jury :

Mr	Haddar Mebarek	MCA	Université de Biskra	Président
Mr	Ferhat Mohammedi	Pr	Université de Biskra	Encadreur
Mme	Boudib wahiba	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024-2025

Dédicace

Je dédie cet humble effort à :

Mes chers parents, qui ont tout sacrifié pour mon éducation et m'ont encouragé, ils ont été la lumière qui a éclairé mon chemin et m'ont soutenu sans limites.

À mes frères, si je partageais ma joie d'aujourd'hui entre vous, chacun d'entre vous aurait une part plus grande dans mon cœur.

À mon superviseur, qui m'a soutenu, m'a guidé vers la réussite et m'a inspiré, merci pour vos précieux enseignements et vos conseils inestimables.

À mes professeurs, qui m'ont transmis leur savoir et leur patience, et qui ont contribué à affiner mes connaissances et à m'orienter vers l'excellence.

Mes amis et collègues qui ont été un véritable soutien tout au long de mon parcours universitaire, partageant avec moi les défis et les succès.

À tous ceux qui ont contribué à ma réussite par un appel sincère, un mot d'encouragement ou un soutien moral, je vous adresse mes sincères remerciements.

Enfin, à mon pays bien-aimé, qui m'a donné l'opportunité d'apprendre et de m'élever, je m'efforce de lui rendre une partie de ce qu'il m'a donné.

"وما توفيقي إلا بالله، عليه توكلت وإليه أنيب".

Table des Matières

Chapitre 1 :

Introduction générale.

1.1 Définition du laser .	1
1.2 Processus de base d'interaction lumière-matière	1
a) Émission spontanée	1
b) Émission stimulée	2
c) Absorption	3
1.3 Différents types de lasers :	6
a) Laser à état solide	3
b) Laser à liquide	3
c) Laser à semi-conducteurs	3
d) Laser à gaz	4
1.4 Lasers à gaz	4
1.5 Laser à gaz dynamique (GDL)	4
1.6 Composants du système	5
1.7 Processus physique	5
1.8 Énergie d'oscillation	10
1.9 Paramètres laser	12
1.11 Les applications des lasers	13

Chapitre 2 :

Introduction	16
2.1 Processus physiques dans les lasers à gaz dynamique	16
2.2 Définition et importance de l'inversion de population	17
2.3 Laser à gaz dynamique à quatre niveaux	19
2.4 Différence entre lasers à trois et quatre niveaux	20
2.5 Condition d'inversion de population pour le modèle à quatre niveaux	21
2.6 Mécanisme de pompage dans les lasers à gaz	23
2.7 Rendement quantique et rendement énergétique d'un laser	27
2.8 Équations différentielles de densité de population	28
2.9 Équations de Statz-de Mars	30
2.10 Mécanismes de dynamique des fluides	33
2.11 Moyens d'amélioration du rendement des lasers à gaz dynamiques	35

Chapitre 3 :

Introduction	37
--------------	----

3.1 Considérations sur la dynamique des gaz	37
3.2 Simulation numérique	39
3.3 Modélisation des changements de population	40
3.4 Conclusion et perspectives.....	45
3.5 Modélisation du gain de puissance d'un laser GDL CO ₂ -N ₂ avec variations des paramètres	46
3.6 Différentes applications des lasers CO ₂ -GDL	48
Conclusion	

Liste des formes :

Figure I.1 : Émission spontanée	2
Figure I.2 : Émission stimulée	2
Figure I.3 : Absorption	3
Figure I.4 : Composants de base d'un système laser à gaz dynamique (GDL)	5
Figure I.5 : Schéma du laser CO ₂ -GDL	6
Figure I.6 : Diagramme énergétique CO ₂ -N ₂	7
Figure I.7 : Principe des lasers à trois et quatre niveaux	9
Figure I.8 : Transitions CO ₂ -HF/DF	11
Figure II.1 (a, b, c) : Réalisation d'une inversion de population par refroidissement rapide.....	13
Figure II.2 (a, b) : Schémas des lasers à trois et quatre niveaux	18
Figure II.3 : Condition d'inversion de population dans un modèle à quatre niveaux...	20
Figure II.4 : Diagramme énergétique avec transitions de résonance et transitions cinétiques dans GDL-N ₂ -CO ₂	21
Figure II.5 : Structure simplifiée du laser chimique CO ₂ -HF-DF	24
Figure II.6 : Structure du laser GDL	25
Figure II.7 : Probabilités de transitions stimulées dans un laser à trois niveaux	25
Figure II.8 : Transitions CO ₂ -HF/DF et CO ₂ -N ₂	28
Figure III.1 : Tuyères dans un laser GDL	34
Figure III.2 : Tuyères convergentes-divergentes (tuyères de Laval).....	38
Figure III.3 : Simulation numérique avec code MATLAB.....	40
Figure III.4 : Évolution des populations moléculaires dans un système à quatre niveaux... ..	42
Figure III.5 : Influence du pompage et des tuyères sur le gain laser.....	48

L'utilisation de plus en plus des lasers a mis en évidence l'importance qu'a prisent ces technologies dans les différents domaines civil et militaire et pourtant il existe cependant un fort contraste entre le développement rapide des technologies laser civiles et le développement beaucoup plus lent des technologies laser militaires, particulièrement les lasers à haute puissance. En effet, les contraintes d'intégration et les conditions de mise en œuvre des technologies avancées sur le champ de bataille sont drastiques et le marché militaire, moteur principal du développement technologique, est incomparablement plus petit que le marché civil grand public : les systèmes militaires incluant des lasers se vendent le plus souvent à quelques centaines d'exemplaires là où des milliers voire des millions d'exemplaires de produits civils peuvent être commercialisés. Mais au cours des dernières décennies, un effort de recherche considérable a été conduit dans le domaine des lasers utilisant comme milieu amplificateur un solide, cristal ou verre, et dans celui des lasers à gaz. Il apparaît qu'un travail important reste à faire pour améliorer nos connaissances sur les lasers à gaz et perfectionner leurs caractéristiques. Parmi ces lasers le laser chimique CO₂-HF-DF et le laser GDL-CO₂-N₂, ce dernier est l'objet de notre étude. Avec un rendement relativement bas (ne dépassant pas 1 à 10 %) ce faible rendement est dû à plusieurs causes. Avant tout l'énergie du mouvement de translation du courant gazeux sortant de la tuyère est dépensée en pure perte (après le freinage et la compression dans le diffuseur le gaz se trouve porté à une haute température). En outre, le courant de gaz sortant de la cavité emporte une certaine quantité de molécules N₂ excitées qui n'ont pas eu le temps de transférer l'énergie d'excitation aux molécules CO₂ ainsi qu'une certaine quantité de molécules CO₂ excitées qui ne sont pas arrivées à se désexciter. Pour élever le rendement d'un laser à gaz dynamique il est nécessaire de réduire les pertes indiquées. La réduction des pertes liées au départ des molécules excitées de la cavité peut s'obtenir par optimisation des paramètres de la cavité et par perfectionnement de sa construction. Quant aux pertes liées à réchauffement du gaz dans le diffuseur, leur réduction exige de prendre des mesures plus radicales. Dans le premier chapitre nous exposerons les lois des phénomènes physiques mis en jeu dans les lasers utilisant un milieu CO₂-N₂ dense. Nous examinerons les propriétés statistiques des molécules et les lois qui déterminent l'excitation et les transferts d'énergie entre niveaux d'une même molécule ou de molécules différentes. Pour aider à comprendre le rôle des principaux paramètres, nous calculerons les conditions d'excitation d'un laser délivrant une puissance de l'ordre de dizaines de kilowatt au Mégawatt.

Dans la première partie, nous avons évoqué les lasers en général et les lasers à gaz en particulier avec une comparaison entre le laser GDL et le laser chimique HF-DF puisqu'ils ont la même conception théorique surtout les transitions spectroscopiques moléculaires.

Dans la deuxième partie théorique nous établirons les liens entre les caractéristiques des processus physiques et les propriétés du milieu amplificateur concernant les diagrammes énergétiques.

Dans la troisième partie, est consacré au calcul des taux de populations et le gain optique en utilisant le logiciel Matlab et Python.

Introduction :

Dans ce chapitre, nous exposons d'abord les principes fondamentaux des lasers en général, avant de nous focaliser sur le laser à gaz dynamique avec une comparaison avec le laser chimique qui est remarquable par son rendement élevé et sa forte puissance - ouvrant ainsi la voie à l'étude de ses applications spécialisées dans les chapitres suivants.

I.1 Définition du Laser

LASER est l'acronyme de (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation,) c'est-à-dire l'amplification de la lumière par l'émission stimulée de rayonnement. Bien que le nom fasse référence à l'amplification, un laser est en fait un oscillateur, et pas seulement un amplificateur. Les lasers fonctionnent en créant un rayonnement lumineux cohérent à des fréquences optiques, ce qui n'existe pas à l'état naturel, et a été démontré expérimentalement pour la première fois en 1960 par T.H. Maiman. [1]

I.2 Processus de base de l'interaction lumière-matière: [1]

Lorsqu'un matériau est exposé à une énergie externe (par exemple via la lumière ou une décharge électrique), les électrons passent des niveaux d'énergie inférieurs à des niveaux supérieurs en gagnant de l'énergie. Lorsqu'ils retournent à l'équilibre, ils libèrent cette énergie sous forme de photons lumineux. La manière dont ces photons sont émis détermine le type de processus qui se produit :

Absorption.

Emission spontanée.

Emission stimulée.

Et d'autres processus que nous aborderons dans ce qui suit.

Ces processus diffèrent par leurs caractéristiques physiques et leurs mécanismes d'occurrence, mais ensemble, ils forment la base de la technologie laser.

a) Emission spontanée :

Transition de l'électron d'un niveau d'énergie bas vers un niveau supérieur en absorbant un photon selon l'équation fondamentale suivante :

$$A = \frac{16\pi^2\nu^3 n^2}{3\epsilon_0 h c^3} \quad \text{I.1}$$

A : Taux de transition spontanée (unité : s⁻¹).

ν : Fréquence du photon émis ($\nu = (E_2 - E_1)/h$).

n : Indice de réfraction du milieu.

Chapitre 1 : Principes de base des lasers.

$|\mu|$: Module du moment dipolaire de transition (unité : C·m).

ϵ_0 : Permittivité du vide ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

c : Vitesse de la lumière dans le vide.



Figure I.1 : L'Emission spontanée.

b) Émission stimulée : (3)

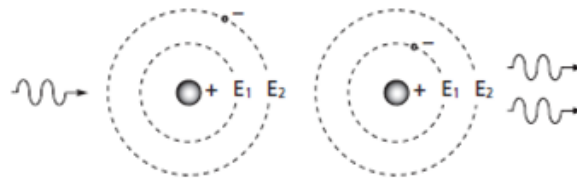


Figure I.2 : Emission Stimulée.

L'émission stimulée est un processus fondamental dans lequel un atome, excité par un champ électromagnétique externe, émet un photon identique au photon incident en phase, direction et fréquence. Ce phénomène est décrit par l'équation clé du taux d'émission stimulée :

$$W_{\text{stim}} = B_{21} \cdot \rho(\nu) \quad \text{I.2}$$

où :

W_{stim} : Taux d'émission stimulée (s^{-1}).

B_{21} : Coefficient d'Einstein pour l'émission stimulée ($\text{m}^3/\text{J} \cdot \text{s}^2$).

$\rho(\nu)$: Densité spectrale d'énergie du champ électromagnétique à la fréquence

L'émission stimulée est à la base de l'amplification cohérente de la lumière dans un laser, produisant un faisceau de photons parfaitement synchronisés (cohérents). Pour qu'elle domine sur l'absorption, une inversion de population ($N_2 > N_1$) est nécessaire, comme le montre la condition :

$$\frac{N_2}{N_1} > \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right) \quad \text{I.3}$$

c) Absorption : [4]

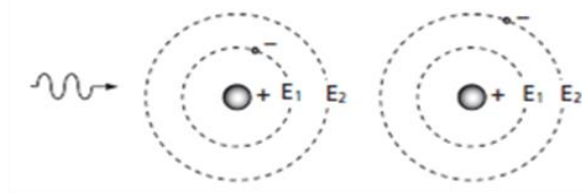


Figure I.3 : L'absorption

Le processus d'absorption se produit lorsqu'un atome ou une molécule absorbe un photon, ce qui entraîne sa transition d'un niveau d'énergie inférieur (E_1) à un niveau supérieur (E_2). Ce phénomène est régi par la relation fondamentale :

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad \text{I.4}$$

h : est la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

ν : est la fréquence du photon.

Le taux d'absorption est décrit par le coefficient d'absorption (α), qui dépend de la densité atomique (N) et de la section efficace d'absorption (σ) selon la relation :

$$\alpha = N\sigma \quad \text{I.5}$$

I.3 Différents types de lasers : [13]

Classification des types de laser Selon la nature du milieu actif.

a) État solide :

Utilise des cristaux ou du verre dopé avec des ions métalliques comme matière active.
Exemples : lasers au néodyme-YAG (Nd:YAG), lasers à saphir.

b) Liquide :

Utilise des colorants organiques dissous dans des solvants. Exemples : lasers à colorants accordables : lasers à colorants accordables.

c) Semi-conducteurs :

Basé sur des jonctions p-n dans des matériaux semi-conducteurs.

Exemples : lasers à diode GaAs.

d) Gaz : Utilise des gaz tels que le dioxyde de carbone ou un mélange hélium-néon.

Exemples : Laser CO₂, laser He-Ne.

I.4 Lasers à gaz : [14]

Les lasers à gaz sont l'un des types de lasers les plus utilisés dans les applications industrielles et scientifiques. Leur principe de base repose sur l'utilisation d'un gaz ou d'un mélange de gaz comme milieu actif à l'intérieur d'un tube à vide. L'inversion de population est obtenue par une décharge électrique qui excite les atomes ou les molécules à des niveaux d'énergie plus élevés.

Les composants de base :

1) Le tube à vide est généralement :

Constitué de :

- Du quartz : Pour la résistance aux températures élevées (jusqu'à 1500°C)
- Céramique : Pour les longueurs d'onde infrarouges (par exemple, laser CO₂).

Système de refroidissement (air ou eau selon la capacité) : [14]

Type	Applications	Efficacité
Refroidissement à air	Lasers basse puissance (<50W)	60-70%
Refroidissement à eau	Lasers haute puissance (jusqu'à 100kW)	85-95%

Conçu avec un tube en cuivre enroulé autour du tuyau d'évacuation.

2) Deux miroirs pour façonner la cavité optique : [15]

Mettant en scène :

Miroir arrière : Réflexion à 99,99 % (revêtement multicouche or/dialectique)

Miroir de sortie : 90-98% de réflectivité (en fonction du gain central)

Montage : Angle de Brewster pour minimiser les pertes

I.5 Lasers à dynamique de gaz : [16]

Un laser dynamique à gaz est un système laser thermo-optique qui génère un rayonnement cohérent en convertissant directement l'énergie thermique en énergie laser, à l'aide des éléments suivants :

La dynamique des gaz à grande vitesse (jusqu'à Mach 5).

Des transitions vibrationnelles-rotationnelles dans les molécules diatomiques/triatomiques (par exemple CO₂-N₂).

Mécanismes de refroidissement hors équilibre créant une inversion dynamique de la population.

I.6 Composants du laser GDL : [17]

Les lasers GDL génèrent leurs faisceaux en refroidissant du gaz chaud sous pression qui se dilate rapidement dans des tuyères spéciales, créant ainsi une inversion de la population énergétique, condition indispensable au fonctionnement du laser.

La réaction globale doit être ralentie par l'ajout d'oxygène, ou l'hélium *He* qui à pour but d'éviter l'explosion précoce du mélange. D'où l'importance de ce type de laser, qui n'exige pas d'accessoires et d'organes supplémentaires, mais seulement des molécules emmagasinés dans des obus sous forte pression.

Les molécules d'hélium sont mises à profit pour empêcher l'échauffement excessif et l'auto-inflammation du mélange fluor-deutérium et de surcroît il aide au dépeuplement du niveau inférieur dans les molécules de CO_2 .

Maintenant il est plus tentant d'expliquer la phénoménologie spectroscopique du laser à gaz dynamique CO_2, N_2 .

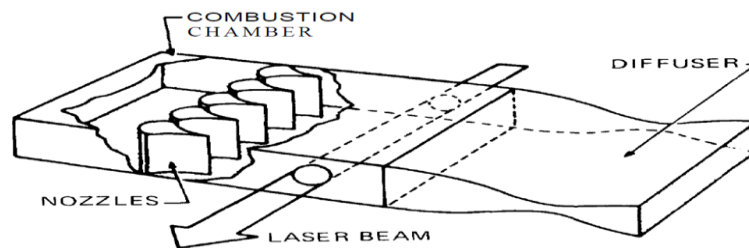


Figure I.4 : Schéma des composants de base d'un système laser à gaz dynamique GDL

I.7 Processus physique du laser gaz dynamique à CO_2 :

C'est un milieu actif utilisant les gaz CO_2, N_2 mélangés dans des proportions adéquates, chauffés à des températures très élevées pour permettre la libération de l'énergie potentielle emmagasinée dans le composé se trouvant dans son état stable : Donc l'excitation se fait thermiquement (le choix de la molécule CO_2 viens du faite qu'elle possède une vie radiative exceptionnellement longue, de l'ordre de 10s, de plus l'autre molécule N_2 aura le temps nécessaire de transféré son énergie à sa partenaire CO_2), voir figure I.5.

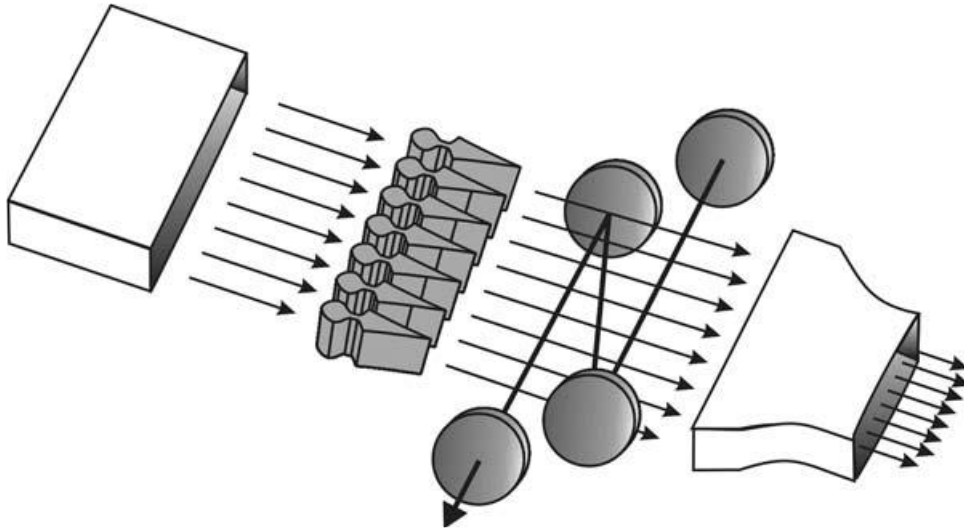


Figure I.5 : Schéma de du laser CO2-GDL

Comme on l'a cité dans l'équation (I.3) cet équilibre s'altère sous l'effet de la haute température selon une statistique de Boltzmann, donc on assiste bien à un peuplement prononcé des niveaux supérieures, mais qui n'implique pas nécessairement l'inversion de populations. Pour obtenir cette relaxation (c'est réalisation contraire à l'équilibre thermodynamique, on fait appel au phénomène de refroidissement) on fait usage de section géométrique calibrée de la forme d'un diffuseur, permettant d'assuré une détente des gaz chauds (nuance est faite entre une tuyère à écoulement subsonique et supersonique).

D'un point de vue mécanique des fluides, on parle de tuyère de détente et non d'une tuyère thermopulsive (à réaction) car le but est d'avoir seulement une chute (adiabatique) de température et de pression, pour que la relaxation ait lieu, par suite on a conversion en énergie électromagnétique cohérente et invisible.

Comme milieu actif on utilise $CO_2 - N_2 - H_2O$ dont la composition centésimale est la suivante : 08% CO_2 , 90% N_2 , 2% H_2O , sous l'effet de la température et l'interaction entre les molécules CO_2, N_2 qui s'entrechoquent et s'excitent, l'énergie cinétique libérée de ce couple se transforme en énergie de vibration.

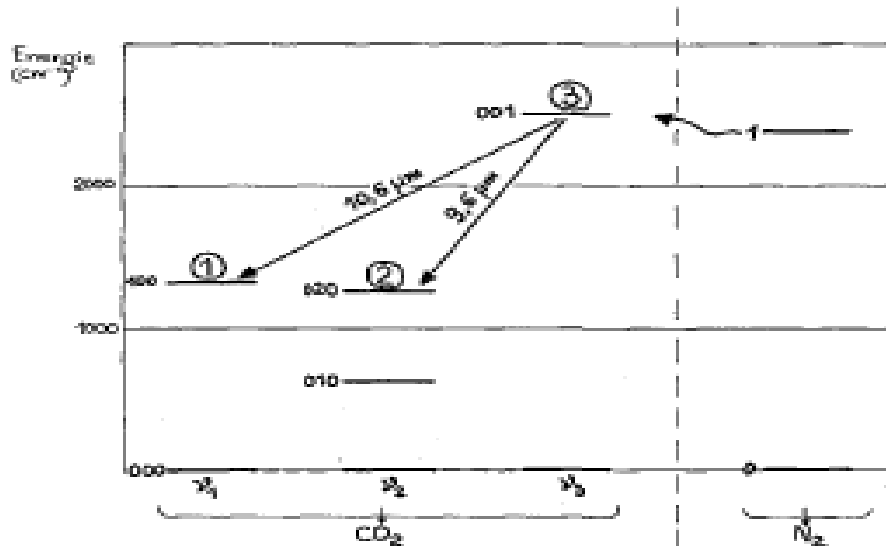


Figure I.6 : Diagramme Energétique CO_2N_2

Les molécules CO_2, N_2 sont particulièrement favorables à cette transformation, et donnent un rendement quantique de l'ordre de 80% à condition que les électrons aient une énergie de 1-2 eV.

La figure I.6 donne les niveaux d'énergie d'un laser à 4 niveaux, pour le N_2 au premier niveau (001) indexé 1, et les niveaux 1(100)"symétrique", 2(020)"déformation", 3(001)"asymétrique" pour le CO_2 . On remarque que le niveau d'énergie 3(001) du gaz carbonique est proche de son homologue N_2 (niveau de vibration) $\nu = 1$, ce qui découle que durant la rencontre entre les molécules $CO_2 - N_2$, un échange d'énergie colossale ait lieu de sorte que le niveau 3(001) se trouve hautement peuplé.

L'inversion de population par résonance se mis en place entre les niveaux d'énergie 3(001) du CO_2 et le niveau 1(100), de manière que l'oscillation laser s'établisse sur une longueur d'onde $\lambda = 10.6 \mu m$. Pour rester dans le même raisonnement l'autre transition du niveau 3(001) au niveau 2(020) se fait aussi par résonance et donne là encore un effet laser sur une longueur d'onde $\lambda = 9.6 \mu m$.

De plus on assiste à l'émergence de transitions radiative sous forme de désactivation, pour les transitions (100) et (020) qui atterrissent au niveau (010), donc ce même niveau constitue une étape critique et charnière pour la relance du dépeuplement et l'amorçage de la relaxation.

L'accent est mis sur la transition (100) qui constitue un point crucial dans le laser à CO_2 , la relaxation se fait selon un mécanisme d'échange d'énergie cinétique aux molécules de He (et dans d'autres cas on utilise l'eau H_2O) ou la nature des collisions est inélastiques entre les molécules de CO_2 au niveau (010) et les additifs subtilement injectés dans le mélange pour catalyser la réaction d'inversion de populations.

Le passage du gaz carbonique dans les tuyères, instaure un dépeuplement du niveau (020) et une chute spectaculaire de la population du niveau (001), dans la cavité la population du niveau (001) est figée à une valeur équivalente à la température issue de la chambre de combustion, en fait en réalité en présence d'une inversion de populations des niveaux (020) et (001).

Le dioxyde de carbone CO_2 aboutit dans la cavité avec des niveaux inférieurs quasi non peuplés, le transit par les tuyères procure à la transition laser une détente pour assurer l'amorçage de la relaxation et la rencontre avec le CO_2 . Cette séquence est rendue possible grâce à la molécule de mono oxyde d'azote NO , dans ce passage il est plus que capitale que CO_2 en état vibrationnel traverse les tuyères pour rencontrer le HF/DF dans la cavité est donnée la transition laser par résonance.

I.8 Energie d'oscillation :

I.8.1 Energie de vibration : [18]

Les valeurs propres obtenues à partir de la résolution de l'équation de Schrödinger, dans le cadre de l'hypothèse que l'oscillateur est harmonique c'est-à-dire les particules se comportent comme des ressorts, l'énergie de vibration est définie par

$$E_v = \left(v + \frac{1}{2} \right) h \nu_v \quad \text{I.6}$$

Dans le cas des lasers à écoulement $CO_2 - N_2$ ou l'échange collisionnel en mode VV est largement prépondérant pour le bas niveau, il en est de même pour les transitions résonantes qui demeurent sélectives sur ce type de mode. Pour donner un ordre de grandeur énergétique, chaque électron possède 40 vibrations et 200 rotations.

Dans le cadre des molécules poly atomiques, il est à considérer la possibilité pour les atomes d'osciller autour de leurs positions moyennes au sein de la molécule, ces vibrations peuvent être engendrées par les chocs moléculaires ; dans le cas des molécules triatomique on écrit donc: $3(p-1)-r$ cela revient à dire que les mouvements à l'intérieur de la molécule sont formés par la superposition de $3(p-1)-r$ vibrations principales.

Chapitre 1 : Principes de base des lasers.

Justement pour notre cas on a la molécule de CO_2 on applique donc : $3(3-1)-2 = 4$ degrés de liberté d'oscillations. Au premier on a une **vibration symétrique linéaire**, au deuxième on attribue une **vibration dissymétrique linéaire**, aux deux derniers une **vibration plane dite de déformation**. Les fréquences de ces vibrations sont désignées respectivement par $\omega_1, \omega_2, \omega_3$: tel que on écrit : $\hbar\omega_1 = 0.163eV, \hbar\omega_2 = 0.078eV, \hbar\omega_3 = 0.276eV$

(Fréquences déterminées par l'analyse spectrale), on constate que $\omega_1 = 2\omega_2$. Les états vibrationnelles de la molécule CO_2 sont désignés par les nombres quantiques de vibration à savoir : ν_1, ν_2 et ν_3 . Sont égaux à la multiplicité d'excitation ordonnée des vibrations voir figure 2.3, symétriques (a), dissymétriques (b), et déformations (c). A titre d'exemple on prend l'état vibrationnel (020) de la figure I., par analogie à ce qui vient d'être dit, on déduit donc :

($\nu_1 = 0, \nu_2 = 2, \nu_3 = 0$). L'explication à cela c'est qu'on ait dans un état où les vibrations déformation sont excitées doublement, alors que les vibrations symétriques et asymétriques ne sont pas excitées, on ajoute à cela pour chacune des vibrations, on peut leur associer une température caractéristique de vibration.

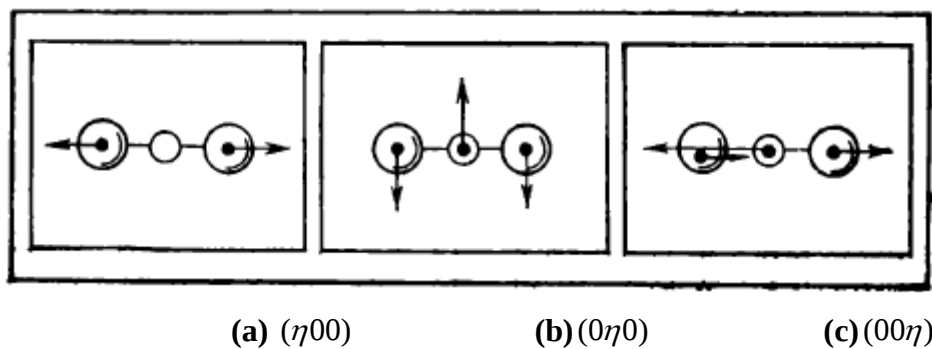


Figure I.6 : Les modes vibrationnels de la molécule CO_2

$$\begin{aligned}\theta_{\nu_1} &= 1830^\circ K (\text{mod } \nu_1 \text{ symétrique}) \\ \theta_{\nu_2} &= 960^\circ K (\text{mod } \nu_2 \text{ flexion}) \\ \theta_{\nu_3} &= 3280^\circ K (\text{mod } \nu_3 \text{ asymétrique})\end{aligned}$$

Pour des températures θ_ν modérées, seuls les niveaux inférieurs sont peuplés d'une manière importante et le modèle d'oscillateur harmonique est considéré, de plus pour ce des molécules diatomiques en particulier, donne une meilleure approche du contenu de l'énergie de vibration. Dans la plage des températures modérées, les collisions vibrationnelles-

vibrationnelle(VV) sont les plus probables pour les bas niveaux les plus peuplés. Nuance pour les niveaux élevés, les collisions translation vibrationnelle sont les plus prépondérantes sous l'effet des températures élevées.

S'agissant des molécules de constitution complexes, il y'a plusieurs modes de vibration et ce proportionnellement à l'atomicité de la molécule considérée. Dans le cadre des molécules triatomiques linéaires, on considère en premier lieu, la contribution de chaque mode, ainsi pour le CO_2 , il y'a trois modes de vibration : symétrique, dissymétrique, et déformation.

Pour le cas du gaz carbonique CO_2 toujours, nous n'avons que trois valeurs de températures [19] à savoir : L'expression donnant la chaleur spécifique à pression constante et à volume constant est :

$$(C_v)_{vibr} = (C_p)_{vibr} = R \left[E\left(\frac{\theta_1}{T}\right) + E\left(\frac{\theta_2}{T}\right) + E\left(\frac{\theta_3}{T}\right) \right] \quad I.7$$

Où E est la fonction d'Einstein.

R : constante de gaz parfait.

L'expression de la chaleur de vibration de la molécule CO_2 est alors:

$$(C_v)_{vibr} = R \left[E\left(\frac{1830}{T}\right) + E\left(\frac{3280}{T}\right) + 2E\left(\frac{960}{T}\right) \right] \quad I.8$$

I.9 Paramètres laser :

Dans la réalité il existe deux grand matrices de fonctionnement des lasers : à trois et quatre niveaux voir figures I.7, ainsi les composés chimiques et/ou ions sont excités à partir de l'état fondamental **1** par pompage, soit électrique, thermique ou chimique jusqu'à au niveau **2**, par relaxation non radiative. Ces ions libèrent une partie de leurs énergies à la matrice hôte et peuplent rapidement le niveau émetteur **3** c'est après que se situe la divergence entre le laser à niveau **3** et le laser à niveau **4** c'est à partir du niveau **3**, les ions se dés excitent radiativement : c'est la transition laser. Cette relaxation se fait au niveau **1** pour le laser à **3** niveaux, soit au niveau **4** pour le laser à **4** niveaux.

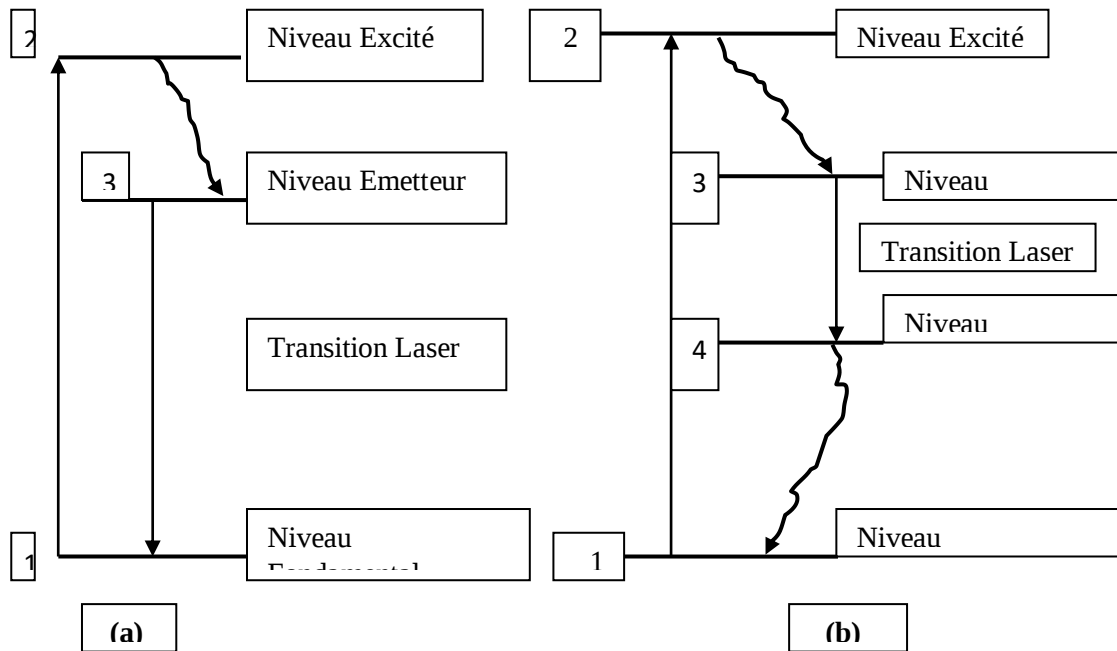


Figure I.7 : Schéma de principe des lasers à 3 et 4 niveaux

En règle générale, le niveau 4 se situe à des énergies suffisamment élevées pour ne pas être inexorablement peuplé à haute température "phénomène d'émission stimulée suit une statistique de Boltzmann". Par voie de conséquence il est plus aisé d'obtenir une inversion de population avec les lasers à quatre niveaux.

Par contre dans le cas des lasers à trois niveaux, le niveau terminal est identiquement confondu avec le niveau fondamental, la transition laser ne pouvant se réaliser, pour cause ce niveau est fortement peuplé.

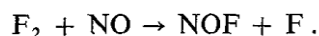
Ce qui nous mènent à constater que dans la pratique c'est bien le laser à quatre niveaux qui est prédominant dans la plupart des applications lasers.

Dans le processus vibrationnel le capital est la désexcitation du niveau (010) car il contrôle la désexcitation des niveaux plus bas (100) et (020) des transitions laser. Cela peut être écrit sous la forme de réaction chimique [20]

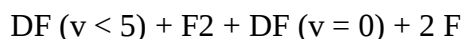


Initiation de la réaction par création d'atome de fluor

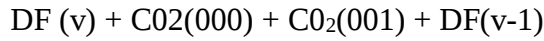
- Production de molécules DF



- Production d'atomes de fluor par la réaction de branchement



- Transfert de l'énergie de vibration de DF au mode du CO_2



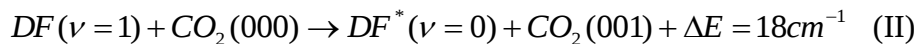
Les deux dernières réactions sont particulièrement intéressantes.

I.10 Similitudes de Processus Laser GDL avec laser Chimique HF-DF : [21]

En substituant M par HF / DF ($k = 5.10^{-15} cm^3 / s$) on constate que cette réaction est relativement rapide, comparé à $M=He$ avec une vitesse de réaction ($k = 1.2.10^{-13} cm^3 / s$), l'ajout du gaz hélium au mélange $CO_2 - HF / DF$ permet alors de diminuer de temps de vie radiative du niveau inférieur et de laminé sa population, pour instaurer le mécanisme de dépeuplement.

Si le mélange est constitué de 50% He sous une pression de service relativement faible dans la chambre, on admet que les modes de vibration sont en équilibre thermodynamique et la température est proche de celle du gaz, ce qui entraine que les populations des niveaux sont régie par une statistique de Boltzmann donc toutes les populations v_1 et v_2 sont conditionnées par celles du niveau (010).

Dans le même ordre d'idée en mode vibrationnel ce processus permet d'excité le niveau (001) de CO_2 à partir du premier niveau déjà excité de HF / DF selon l'initiation :



La cinétique de la réaction est : $k = 6.10^{-13} cm^3 / s$ qui exprime qu'un tel phénomène est hautement rapide, et la résonnance se met en place pour donner lieu au rayonnement cohérent sur une fréquence de $10.6 \mu m$.

Donc, le système se comporte comme il s'agit d'un réservoir sous pression (assimilé à un tube à choc), partant des conditions d'une enceinte en équilibre (gaz au repos sous condition de température et pression bien établie), la détente du gaz dans la tuyère entraine une forte chute de température et de densité, les gaz dissociés provenant de la réaction en chaine largement longue, tendent à se recombiner et l'énergie de vibration à baissée.

Remarque est faite concernant les temps caractéristiques de recombinaison et de relaxation vibrationnelle, qui sont presque de même ordre de grandeur, ou d'un ordre inférieur au temps caractéristique de l'écoulement supersonique dans la tuyère, l'écoulement est hors équilibre, et il y'a lieu "gèle", "figeage" en anglais "frozen", des concentrations et/ou de l'énergie de vibration à des valeurs supérieures à celles de l'équilibre locale.

Le figeage proprement dit est une condition très importante voir même vitale pour l'obtention de l'effet laser escompter. Autrement dit, cette condition de figeage permet au gaz

Chapitre 1 : Principes de base des lasers.

en mouvement de conserver ces propriétés dans le milieu actif au sein de la cavité pour obtenir le laser.

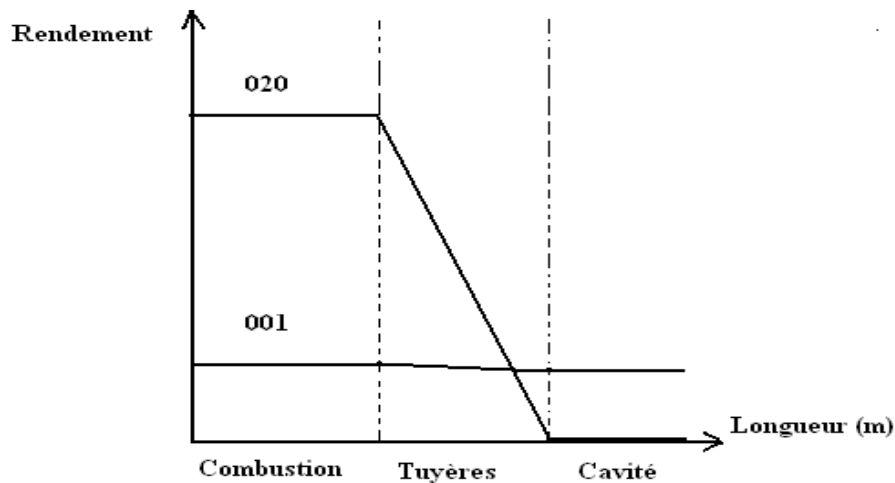


Figure I.8 : Formulation des transitions $CO_2 - HF / DF$

Le passage du fluor atomique ou le Deutérium dans les tuyères, instaure un dépeuplement du niveau (020) et une chute spectaculaire de la population du niveau (001), dans la cavité la population du niveau (001) est figée à une valeur équivalente à la température issue de la chambre de combustion, en ai en réalité en présence d'une inversion de populations des niveaux (020) et (001) voir figure I.8.

Le dioxyde de carbone CO_2 aboutit dans la cavité avec des niveaux inférieurs quasi non peuplés, le transit par les tuyères procure à la transition laser une détente pour assuré l'amorçage de la relaxation et la rencontre avec le CO_2 . Cette séquence est rendue possible grâce à la molécule de mono oxyde d'azote NO , dans ce passage il est plus que capitale que CO_2 en état vibrationnel traverse les tuyères pour rencontrer le HF/DF dans la cavité est donnée la transition laser par résonance. On remarque les similitudes des processus physiques dans les deux types de laser chimique CO_2 - HF - DF et CO_2 - N_2 - He .

1.11 Les applications des lasers : [22]

a) Applications militaires :

- ✓ Systèmes de défense antimissile
- ✓ Systèmes de ciblage d'armes de précision
- ✓ Systèmes anti-drones

b) Applications industrielles

- ✓ Découpe de métaux épais (acier jusqu'à 150 mm)

Chapitre 1 : Principes de base des lasers.

- ✓ Soudage de métaux hétérogènes
- ✓ Traitement de surface des matériaux
- c) Applications médicales
 - ✓ Chirurgie des tumeurs profondes
 - ✓ Chirurgie oculaire de précision
 - ✓ Applications dentaires
- d) Applications spatiales
 - ✓ Systèmes de propulsion des engins spatiaux
 - ✓ Essais d'entrée dans l'atmosphère
- e) Recherche scientifique
 - ✓ Expériences de fusion nucléaire
 - ✓ Études sur la dynamique des gaz
 - ✓ Spectroscopie laser avancée

Conclusion du Chapitre :

Ce chapitre retrace le parcours fondateur de la technologie laser, depuis son invention historique jusqu'aux principes physiques qui régissent son fonctionnement. À travers l'exploration des principaux types de lasers (à état solide, liquides, gaz) et des mécanismes d'interaction lumière-matière (absorption, émission spontanée et stimulée), on comprend comment cette technologie s'est transformée d'une simple expérience de laboratoire en un outil révolutionnaire, devenu aujourd'hui la pierre angulaire des applications modernes dans les domaines industriels, médicaux et des télécommunications. Ce chapitre pose les bases fondamentales pour appréhender les applications avancées qui seront explorées dans les chapitres suivants.

Introduction :

Le laser à gaz dynamique (GDL) est l'un des systèmes avancés qui repose sur le contrôle précis des processus thermiques et chimiques dynamiques pour obtenir une réflexion de la population. Ce système fonctionne en refroidissant rapidement le gaz comprimé pendant son expansion dans les buses, ce qui crée un déséquilibre thermique nécessaire au fonctionnement du laser. Le laser à gaz dynamique se caractérise par son rendement élevé et sa capacité à produire des puissances élevées, ce qui le rend très important dans les applications militaires et industrielles. Dans ce chapitre, nous passerons en revue les principes physiques fondamentaux qui régissent son fonctionnement, en mettant l'accent sur le rôle des facteurs dynamiques et chimiques dans l'amélioration de ses performances.

II.1 Le processus physique dans le laser à gaz dynamique (G.D.L) Méthodes thermiques de réalisation d'une inversion de populations :

Un peuplement efficace des états vibrationnels et rotationnels d'une molécule peut être obtenu par excitation thermique. A cet effet, le gaz de molécules doit être chauffé à une température d'environ 1000 à 2000 K.

Bien entendu, une simple élévation de la température du gaz ne peut pas assurer une inversion de populations ; dans ce cas, la population des niveaux décroît, lorsque l'énergie augmente, suivant la loi de Boltzmann : $n \sim e^{-E/kT}$. La figures. 2-1., a et b montrent à titre de comparaison le caractère de peuplement des niveaux vibrationnels pour deux températures différentes (température T_1 et T_2 telles que $T_1 < T_2$). La courbe 1 représente l'allure de la variation ($n \sim \exp(-E/kT_1)$) et la courbe 2 celle de la variation ($n \sim \exp(-E/kT_2)$). On voit bien que l'élévation de la température conduit à un peuplement efficace des niveaux supérieurs mais n'assure pas l'inversion de populations. Supposons qu'un gaz chauffé à la température T_2 se refroidit rapidement à la température T_1 ; soit τ le temps pendant lequel la température du gaz subit cette variation. Supposons également que la vitesse de relaxation du premier niveau excité (du niveau E_1) est Plus exactement, nous supposons que le temps de relaxation du niveau E_1 (temps τ_1) est beaucoup plus petit que τ , alors que le temps de relaxation des niveaux plus hauts (temps τ_2) est au contraire beaucoup plus grand que τ : $\tau_1 \ll \tau \ll \tau_2$.

Dans ce cas la population du niveau E_1 suivra, lors du refroidissement du gaz, la variation de la température tandis que les populations des autres niveaux resteront, en cas d'une baisse rapide de la température, inchangées. Il en résultera une situation hors de l'équilibre thermodynamique : la population du niveau E_1 correspondra à la basse température T_1 tandis que les populations des niveaux $E_2, E_3, \dots$ correspondront à la haute température

Chapitre2 : mécanismes d'inversion de population dans le laser à gaz dynamique.

T2 . Comme il est bien visible sur la figure, dans cette situation se réalise une inversion de populations sur la transition entre les premiers et deuxième niveaux vibrationnels excités [1]. Pour obtenir un refroidissement rapide d'un gaz il est le plus commode d'utiliser sa détente adiabatique à la sortie d'une fente étroite ou d'une tuyère. C'est précisément sur cette variante de pompage thermique qui est à la base du fonctionnement des lasers a gaz dynamiques. Notons qu'une inversion de populations peut également s'obtenir par un échauffement rapide d'un gaz à condition que la vitesse de l'excitation thermique des niveaux supérieurs de la molécule soit plus grande que celle des niveaux inférieurs. Un échauffement suffisamment rapide de systèmes gazeux peut s'obtenir en utilisant par exemple les ondes de choc.

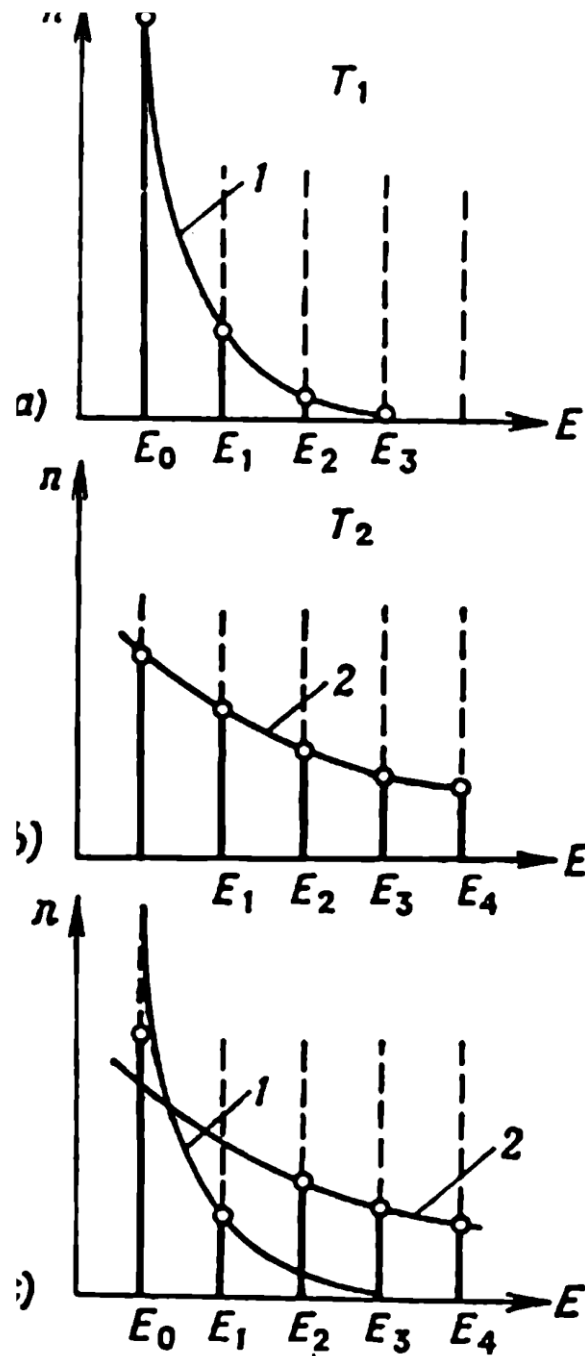


Figure II.1 : (a,b,c)

II.2 Définition de l'inversion de population et son importance dans les lasers à gaz dynamiques :

1) Définition approfondie de l'inversion de population : [2]

L'inversion de population est un état hors équilibre atteint lorsque :

- Le nombre de molécules/atomes dans le niveau d'énergie supérieur (par exemple $\text{CO}_2(00^0_1)$) devient supérieur à celui du niveau inférieur (par exemple $\text{CO}_2(10^0_0)$).
- Mathématiquement exprimé par :

$$\Delta N = N_2 - N_1 > \frac{\gamma}{\sigma} \quad \text{II.1}$$

Où :

γ : coefficient de perte dans la cavité.

σ : section efficace d'émission stimulée.

2) Importance pratique dans les lasers dynamiques :

Haute efficacité (jusqu'à 30%)

Comparé à 10% pour les lasers statiques, grâce à :

Réduction des pertes thermiques.

Vidange instantanée du niveau inférieur par écoulement gazeux.

Puissances extrêmes (jusqu'à 100 kW)

Permis par :

Régénération continue du gaz excité.

Refroidissement efficace empêchant la dégradation thermique.

L'inversion de population dans les lasers dynamiques résulte de processus thermodynamiques précis impliquant :

- Pompage efficace par décharge électrique.
- Refroidissement rapide maintenant l'inversion.
- Conception hydrodynamique stabilisant l'écoulement.

II.3 Définition d'un laser à gaz dynamique à quatre niveaux : [3]

chapitre IV Un laser gazeux dynamique à quatre niveaux est un système laser basé sur quatre niveaux d'énergie principaux dans un mélange gazeux (typiquement CO₂-N₂ avec un catalyseur tel que H₂O ou He), où :

- Une inversion de population est créée entre les niveaux supérieur (001) et inférieur (100) de CO₂.
- Le plan N₂(v=1) agit comme un plan de stockage d'énergie intermédiaire.
- Utilise l'expansion rapide du gaz à travers la buse de Laval pour créer un déséquilibre thermique.
- Très efficace grâce à la séparation de la voie de pompage (via N₂) et de la voie d'émission du laser (via CO₂).

1) Caractéristiques distinctives :

- Voies de pompage et d'émission indépendantes.
- Possibilité de réaliser une double inversion de population.

- Efficacité de conversion de puissance supérieure à celle des systèmes binaires.
- Puissance de sortie laser élevée à $10,6 \mu\text{m}$.

II.4 La différence entre les lasers à 3 et 4 niveaux: [4]

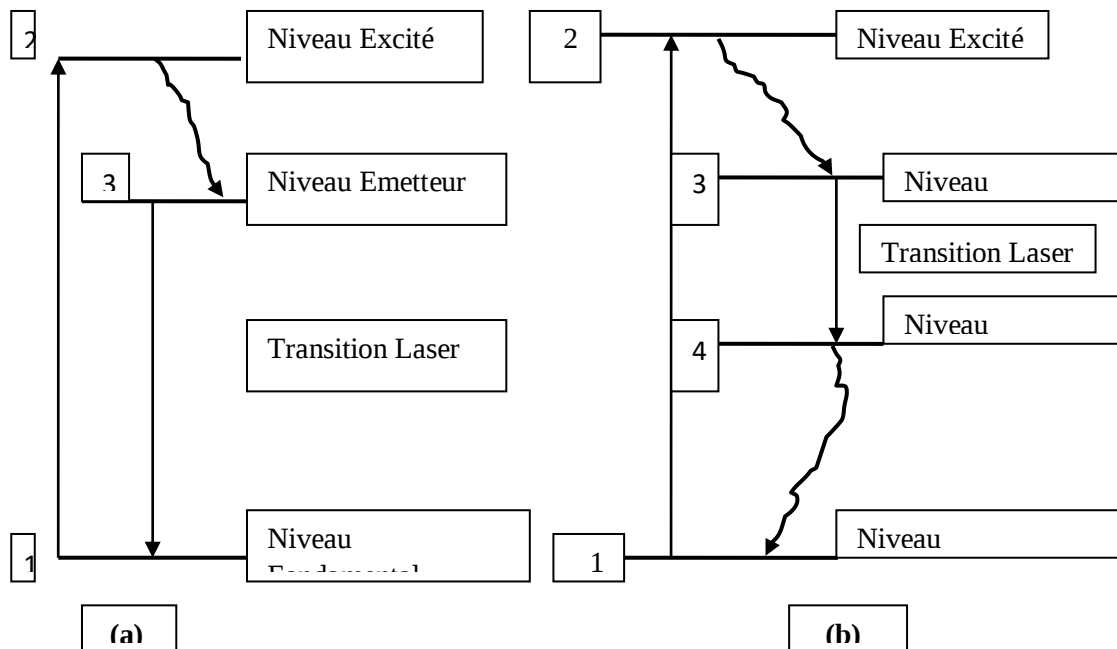


Figure II.2 :(a) Schémas laser à trois niveaux et (b) à quatre niveaux

Il est naturel de se demander s'il est possible de produire une population inversée en utilisant plus de deux niveaux à partir d'un ensemble infini de niveaux pour un système atomique donné. Comme nous le verrons, la réponse est affirmative dans ce cas, on parlera donc de laser à trois niveaux ou de laser à quatre niveaux, selon le nombre de niveaux utilisés (figure 1.4). Dans un laser à trois niveaux (figure II .2a), les atomes passent d'une manière ou d'une autre du niveau de base 1 au niveau 3. Si le matériau est tel qu'après avoir été élevé au niveau 3, l'atome retombe rapidement au niveau 2 (éventuellement par désintégration rapide non radioactive), on peut obtenir une inversion de comptage entre les niveaux 2 et 1. Dans un laser à quatre niveaux (figure 1.4b), les atomes passent d'une manière ou d'une autre du niveau de base 1 au niveau 3. Dans un laser à quatre niveaux (figure II.2b), les atomes sont ramenés du plan de masse (par commodité, nous l'appelons maintenant niveau 0) au niveau 3. Si l'atome se désintègre ensuite rapidement au niveau 2 (par exemple, à nouveau par une désintégration rapide non radioactive), une inversion du comptage des atomes peut être obtenue à nouveau entre les niveaux 2 et 1. Mais une fois que l'oscillation commence dans un

tel laser à quatre niveaux, les atomes se déplacent alors vers le niveau 1, par émission stimulée. Pour un fonctionnement en onde continue (CW), il est donc essentiel que la transition $1 \rightarrow 0$ doit également être très rapide (ce qui est généralement dû à une désintégration non radioactive rapide).

II.5 Condition d'inversion de populations pour un modèle à quatre niveaux :[5]

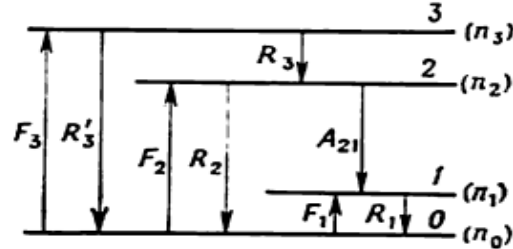


Figure II .3 : Condition d'inversion de population dans un modèle à quatre niveaux

La figure (II.3) représente le schéma à quatre niveaux et montre celles des transitions qui sont prises en compte. Les probabilités des transitions, rapportées à l'unité de temps, sont désignées par des lettres placées près des flèches correspondantes sur la figure. Puisque le laser n'oscille pas, on ne tient compte dans le canal laser 2-1 que de l'émission spontanée (A_{21} est le coefficient d'Einstein d'émission spontanée). L'équation du bilan pour les populations stationnaires (pompage stationnaire) revêt la forme suivante :

$$\text{pour le niveau 3} \quad F_3 n_0 - (R_3 + R_3') n_3 = 0 \quad \text{II.2}$$

$$\text{pour le niveau 2} \quad R_3 n_3 + F_2 n_0 - (R_2 + A_{21}) n_2 = 0 \quad \text{II.3}$$

$$\text{pour le niveau 1} \quad F_1 n_0 + A_{21} n_2 - R_1 n_1 = 0 \quad \text{II.4}$$

Expliquons comment on obtient ces équations, par exemple (II.2). La vitesse de croissance de la population du niveau 3 est égale au nombre de transitions $0 \rightarrow 3$ par unité de temps dans l'unité de volume, c'est-à-dire à $F_3 n_0$.

La vitesse de décroissance de cette population est égale à la somme des nombres des transitions $3 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 0$, c'est-à-dire à $(R_3 + R_3') n_3$. Dans le cas stationnaire, les vitesses de croissance et de décroissance de la population du niveau doivent se compenser exactement, d'où résulte l'équation (II.2).

En introduisant les notations $\frac{n_0}{n_1} = x$, $\frac{n_2}{n_1} = y$, $\frac{n_3}{n_1} = z$, récrivons les équations du bilan sous forme du système d'équations suivant:

$$\left. \begin{aligned} F_3x &= (R_3 + R_3')z \\ F_2x + R_3z &= (R_2 + A_{21})y \\ F_1x + A_{21} &= R_1 \end{aligned} \right\} \quad \text{II.5}$$

Dans le cas considéré la condition d'inversion de populations prend la forme

$$y > 1, \quad \text{II.6}$$

En exprimant y à partir de (II.5) et en l'introduisant dans (II.6) on peut obtenir l'inégalité suivante :

$$R_1 > [A_{21} + F_1 \frac{A_{21} + R_2}{F_3 + F_3 R_3 / (R_3 + R_3')}] \quad \text{II.7}$$

Le rapport $(\frac{R_3}{R_3 + R_3'})$ exprime la probabilité relative pour le centre actif se trouvant au niveau 3 de passer au niveau 2. Par conséquent, $\frac{F_3 R_3}{(R_3 + R_3')}$ est la probabilité de peuplement du niveau 2 par l'intermédiaire du niveau 3. Mais, les centres actifs pouvant passer au niveau 2 également par la transition $0 \rightarrow 2$, la somme

$$F = F_2 + [F_3 R_3 / (R_3 + R_3')] \quad \text{II.8}$$

Donne la probabilité totale de peuplement du niveau supérieur de la transition laser. Remarquons également que la somme

$$R = A_{21} + R_2 \quad \text{II.9}$$

Exprime évidemment la probabilité totale de dépeuplement (de relaxation) du niveau supérieur. Compte tenu des relations (II.8) et (II.9), récrivons la condition d'inversion de populations (1.1.9) sous la forme

$$(R_1 - A_{21})/R > F_1/F \quad \text{II.10}$$

Principes généraux de réalisation de l'inversion de populations.

Pour obtenir l'inversion de populations il est essentiel que le peuplement ou le dépeuplement des niveaux correspondants du centre actif soit sélectif. Reportons-nous à ce propos à la condition (II.10).

Il en résulte avant tout que l'inversion de populations stationnaire suppose la réalisation de l'inégalité

$$R_1 > A_{21} \quad \text{II.11}$$

Autrement dit, la probabilité totale de dépeuplement du niveau inférieur de la transition laser doit être plus forte que la probabilité de son peuplement par suite des transitions spontanées depuis le niveau supérieur.

La condition (9) montre également que pour établir l'inversion de populations il est souhaitable d'assurer les inégalités

$$F \gg F_1 \quad \text{II.12}$$

$$R_1 \gg R \quad \text{II.13}$$

Ces inégalités reflètent précisément le facteur de sélectivité, déjà mentionné, nécessaire à la réalisation de l'inversion de populations.

L'inégalité (11) signifie que la probabilité totale de peuplement du niveau supérieur de la transition laser doit être nettement plus grande que la probabilité totale de peuplement du niveau inférieur.

L'inégalité (12) signifie que la probabilité totale de relaxation du niveau inférieur doit excéder sensiblement la probabilité totale de relaxation du niveau supérieur de la transition laser.

En pratique, pour obtenir l'inversion de populations, il suffit d'assurer la réalisation de l'une au moins de deux inégalités indiquées.

A ce propos il importe de noter que l'inversion de populations peut être réalisée non seulement grâce à un peuplement plus élevé du niveau supérieur (par rapport au niveau inférieur), mais également par un dépeuplement plus élevé du niveau inférieur. Ainsi, en analysant les méthodes de pompage, faut-il prendre en considération le rapport qui existe entre les probabilités des mécanismes de peuplement et de dépeuplement des niveaux des transitions laser.

II.6 Mécanisme de pompage dans les lasers à gaz : [6]

Le milieu actif utilisé est ici un mélange $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Les proportions caractéristiques des composants (en volume) sont les suivantes : 8 % CO_2 , 90 % N_2 et 2 % H_2O . Les centres actifs sont constitués par des molécules CO_2 .

Transferts entre les différents niveaux d'énergie de N_2 et de CO , et transformation de l'énergie vibrationnelle en énergie laser. - Les paramètres qui déterminent la valeur de l'énergie laser qu'il est possible d'extraire du mélange excité, sont :

- a) la durée de vie du niveau supérieur 3 de la molécule de CO_2
- b) le temps de transfert de l'énergie vibrationnelle stockée sur le niveau $v = 1$ de N_2 vers le niveau 3 du CO_2 ;
- c) le temps de transfert entre les niveaux vibrationnels et rotationnels du mode v_3 , du CO_2

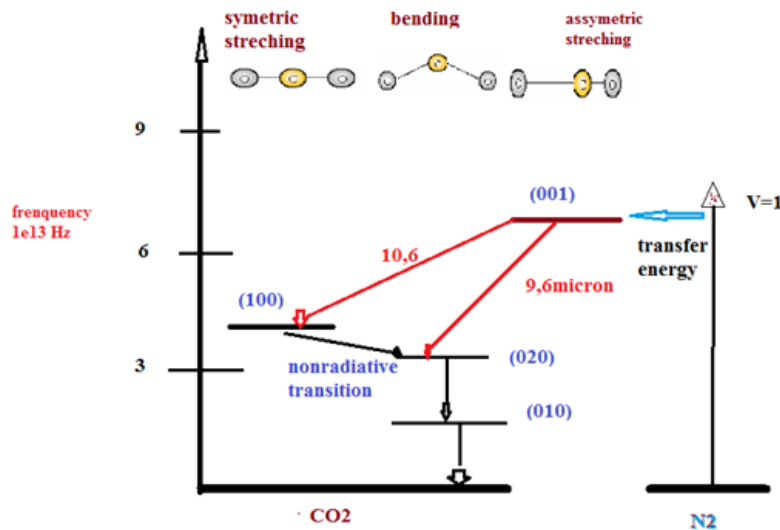


Figure II.4. Diagramme énergétique, avec transitions de résonance et transitions cinétiques dans GDL-N2-CO2.

Un schéma simplifié du laser à gaz dynamique est représenté sur les figures ci-dessous. On y distingue : 1, une préchambre ; 2, le bloc de tuyères ; 3, le volume utile (volume de la cavité optique) ; 4, un diffuseur ; 5, les miroirs de la cavité ; 6, le rayonnement laser. Dans la préchambre 1 le mélange gazeux actif est préparé à son état initial (température- $T_2=1400$ à 1600 K, pression $P_2=20$ à 30 atm). Ce mélange passe, par le bloc de tuyères 2 (la largeur d'une fente de sortie distincte dans le bloc n'est que de 1 mm) et se détend dans le volume utile 3. Lors de cette détente, la température et la pression baissent jusqu'à des valeurs de $T_1=250$ à 300 K, $P_1=0,05$ à $0,1$ atm; la vitesse de flux de gaz à la sortie du bloc de tuyères est de 1200 à 1500 m/s c'est à l'ordre de 4 mach. Dans le volume utile 3 il se produit une désexcitation des molécules CO2. Le diffuseur 4 sert à freiner le flux de gaz et à adapter sa pression à la pression de l'air ambiant.

Les lasers à CO2 dynamiques existant actuellement détiennent le record de puissance du rayonnement émis qui atteint 100 kW en continu. Malheureusement, le rendement des lasers à gaz dynamiques

est bien médiocre, il ne dépasse pas 1 à 10 %.

A titre de comparaison et presque de la même structure le laser chimique HF-DF offre un rendement à l'ordre de 70% , Le choix de ce type de laser relève de l'intérêt même à l'échelle moléculaire des arrangements chimiques qui constituent de grands accumulateurs d'énergie, de plus la désexcitation des molécules constituant les centres actifs se fait d'elle-

même, d'où l'importance capitale de ne pas chercher un procédé plus ou moins élaboré pour amorcer la désexcitation. De plus le processus doit être accéléré par des réactions chimiques très rapides pour assurer un peuplement suffisamment conséquent des niveaux supérieurs pour les molécules effectuant la transition laser. Les schémas expliquent les deux structures dans les deux cas un laser chimique CO₂-HF-DF et un laser CO₂-N₂

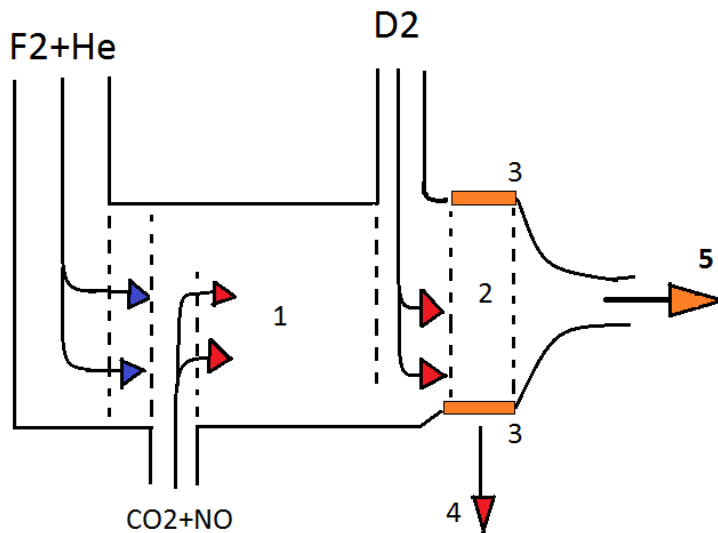


Figure II.5. Structure simplifiée du laser chimique-CO₂-HF-DF

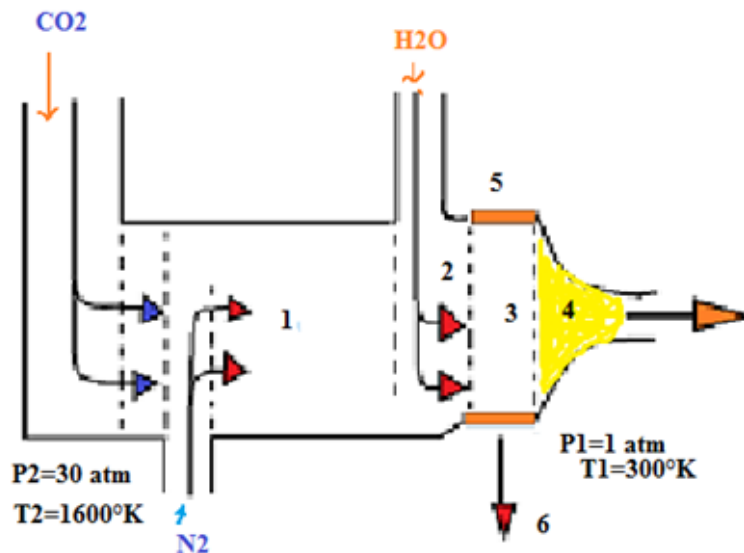


Figure II.6.. laser -GDL

1, une préchambre ; 2, le bloc de tuyères ; 5, le volume utile (volume de la cavité optique) ; 4, un diffuseur ; 5, les miroirs de la cavité ; 6, le rayonnement laser

Chapitre2 : mécanismes d'inversion de population dans le laser à gaz dynamique.

Le pompage dans les lasers à gaz à quatre niveaux repose sur une décharge électrique ou un pompage optique pour transférer les atomes/molécules de l'état fondamental vers des niveaux excités. Voici les détails :

a) Pompage par décharge électrique (le plus courant) :

- Une tension électrique élevée (plusieurs kilovolts) est appliquée à travers un tube rempli de gaz.

- Les électrons libres entrent en collision avec les atomes/molécules (comme CO₂ ou He-Ne), les excitant vers des niveaux d'énergie supérieurs.

Exemple avec le laser CO₂ :

Les molécules de CO₂ sont excitées vers le niveau vibrationnel asymétrique (00⁰1) via des collisions avec des électrons ou des atomes d'azote (N₂).

1.1 Transitions non radiatives (3→2) [7]

Dans les lasers à gaz, les transitions non radiatives sont plus lentes que dans les lasers solides et se produisent via :

a) Collisions entre molécules :

Dans le laser CO₂, l'énergie passe du niveau (00⁰1) à (10⁰0) via des collisions avec des atomes d'hélium (He) ou d'autres molécules de CO₂.

Temps de transition : ~0,1-1 microseconde.

b) Transfert d'énergie résonant :

Dans le laser He-Ne, l'énergie passe des atomes de He excités aux atomes de Ne via des collisions résonantes.

1.2 Transition laser (2→1) [8]

L'émission stimulée se produit entre les niveaux supérieur et inférieur, avec les caractéristiques suivantes :

a) Dans le laser CO₂ :

- Transition : de (00⁰1) à (10⁰0) avec une longueur d'onde de 10,6 μm (infrarouge).
- Efficacité élevée (~20 %) grâce aux transitions vibration-rotation.

b) Dans le laser He-Ne :

Transition : de 3s₂ à 2p₄ dans le Ne avec une longueur d'onde de 632,8 nm (rouge visible).

1.3 Vidange du niveau inférieur (1→0) : [9]

La vidange rapide du niveau inférieur est crucial pour maintenir l'inversion de population :

a) Dans le laser CO₂ :

- La molécule passe de (10⁰) à (01¹0) via des collisions avec des atomes de He ou N₂, puis retourne à l'état fondamental.
- Temps de vidange : ~1-10 microsecondes.

Les lasers à gaz à quatre niveaux, comme le CO₂, offrent une haute efficacité de conversion d'énergie, particulièrement dans l'infrarouge. Leur fonctionnement repose sur des interactions entre molécules et atomes dans un milieu gazeux, avec un contrôle précis de la pression et de la température pour atteindre l'inversion de population.

II.7 Rendement quantique et rendement énergétique d'un laser :[10]

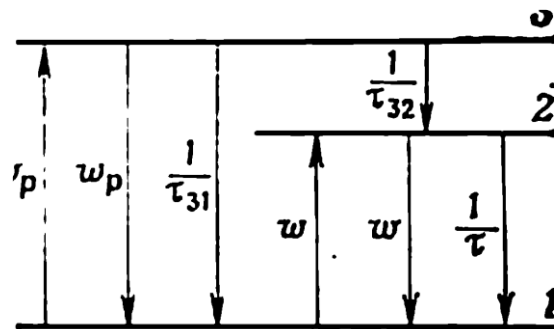
Le choix d'un schéma des niveaux d'énergie du centre actif et d'une méthode de pompage conditionnent en grande partie la valeur du rendement du laser. Supposons que le centre actif se décrive par un schéma à quatre niveaux (modèle a quatre niveaux du laser ; fig. 2.). On distingue sur cette figure : 0, le niveau fondamental ; 1 et 2, les niveaux inférieur et supérieur des transitions laser ; 3, le niveau peuplé sous l'action du pompage (niveau d'excitation). Admettons que toute la puissance de pompage est absorbée par les centres actifs si bien que les transitions barrées sur la figure ne se produisent pas. Dans ce cas idéal le rendement du laser est maximal ; il est égal au rapport de l'énergie du photon émis à l'énergie d'excitation dépensée à l'excitation d'un seul centre actif. En réalité, toute la puissance de pompage n'est pas absorbée par les centres actifs. Une fraction de cette puissance est dissipée et une autre fraction est absorbée par des particules non actives. L'expression donnant le rendement d'un laser doit donc comporter un facteur qui caractérise la partie de la puissance de pompage absorbée par les centres actifs ; En outre, tous les centres actifs excités n'arrivent pas à atteindre le niveau supérieur 2 ; certains de ces centres passent du niveau 3 directement au niveau 1 ou au niveau 0. Il en résulte que l'expression traduisant le rendement d'un laser doit faire intervenir encore un facteur qui est le rapport du nombre de centres actifs ayant passé par la transition laser au nombre total de centres actifs excités au niveau 3. Paradoxalement on remarque que le pompage se caractérise par une haute sélectivité : il n'assure que le peuplement du niveau 3. L'utilisation d'un pompage

moins sélectif peut provoquer le peuplement non seulement du niveau 3 mais du niveau 1 par exemple, ce qui entraînera une diminution du facteur de sélectivité.

II.8 Equations différentielles pour la densité d'inversion de populations (lasers à trois et à quatre niveaux).: [11]

Dans cette partie théorique, nous allons nous concentrer sur les équations fondamentales qui régissent le fonctionnement d'un laser à quatre niveaux, en expliquant la signification physique de chaque équation et son rôle dans le processus de génération laser. Cette compréhension est essentielle avant de passer aux applications pratiques. utilisons une simplification dite à deux niveaux : supposons qu'au niveau 3 les centres actifs ne s'accumulent pratiquement pas (en arrivant au niveau 3 ils le quittent rapidement en passant

principalement au niveau 2. Alors le schéma à trois niveaux devient semblable au schéma à deux niveaux.



FigureII.7 les probabilités de transitions stimulées avec le canal d'oscillation ici un laser à 3 niveaux.

Reportons-nous maintenant au schéma *a quatre niveaux* dans lequel le pompage s'effectue dans le canal 0-3 et l'oscillation dans le canal 2-1. De même que dans le schéma à trois niveaux nous utiliserons la simplification à deux niveaux en supposant qu'après l'arrivée au niveau 3 les centres actifs passent rapidement au niveau 2. Nous supposerons en outre que le niveau inférieur 1 de la transition laser se vide rapidement (la vitesse de la transition 1-- 0 est suffisamment grande). Dans le cadre d'une telle hypothèse simplificatrice il n'est pas difficile d'obtenir pour la densité d'inversion de populations N .

1.1 Équation du niveau fondamental (E_0) :

$$\frac{dN_0}{dt} = W_{03}(N_3 - N_0) + \frac{N_1}{\tau_{10}} - \frac{N_0}{\tau_{03}} \quad \text{II.14}$$

Chapitre2 : mécanismes d'inversion de population dans le laser à gaz dynamique.

- Premier terme ($W_{03}(N_0 - N_3)$): Représente le taux de pompage des atomes du niveau fondamental E_0 vers le niveau de pompage E_3 . Ce taux dépend de la puissance de la source lumineuse ou électrique utilisée pour le pompage.

- Deuxième terme (N_1/τ_{10}) : Décrit la transition des atomes du niveau inférieur du laser E_1 vers le niveau fondamental E_0 via un processus de relaxation non radiative.

- Troisième terme (N_0/τ_{03}) : Représente la faible perte d'atomes due à la transition inverse de E_0 vers E_3 .

Suivre l'évolution du nombre d'atomes dans le niveau fondamental en raison des processus de pompage et de relaxation.

Équation du niveau de pompage (E_3) : [12]

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{03}(N_0 - N_3) - \frac{N_3}{\tau_{32}} \quad \text{II.15}$$

- Premier terme ($W_{03}(N_0 - N_3)$) : Décrit le taux de transition des atomes du niveau fondamental E_0 vers le niveau de pompage E_3 .

- Deuxième terme (N_3/τ_{32}) : Représente la transition des atomes du niveau de pompage E_3 vers le niveau supérieur du laser E_2 via une relaxation non radiative rapide.

Garantir que les atomes ne s'accumulent pas dans le niveau de pompage et qu'ils sont rapidement transférés vers le niveau supérieur du laser.

Équation du niveau supérieur du laser (E_2) [13]

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} \sigma \phi (N_2 - N_1) \quad \text{II.16}$$

- Premier terme (N_3/τ_{32}) : Décrit l'arrivée des atomes du niveau de pompage E_3 vers le niveau supérieur du laser E_2 .

- Deuxième terme (N_2/τ_{21}) : Représente la perte d'atomes due à l'émission spontanée ou à la relaxation non radiative de E_2 vers E_1 .

- Troisième terme ($\sigma \phi (N_2 - N_1)$) : Décrit le processus d'émission stimulée, où :

$\sigma \phi$: Section efficace d'émission stimulée.

ϕ : Densité de photons dans la cavité.

$(N_2 - N_1)$: Inversion de population (doit être positive pour que le laser fonctionne).

Chapitre2 : mécanismes d'inversion de population dans le laser à gaz dynamique.

Calculer le nombre d'atomes disponibles pour l'émission stimulée et maintenir l'inversion de population.

1.2 Équation du niveau inférieur du laser (E_1) : [14]

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_2}{\tau_{21}} + \sigma c \phi (N_2 - N_1) - \frac{N_1}{\tau_{10}} \quad \text{II.17}$$

- Premier terme (N_2/τ_{21}) : Décrit la transition des atomes du niveau supérieur E_2 vers le niveau inférieur E_1 .

- Deuxième terme ($\sigma c \phi (N_2 - N_1)$) : Représente les atomes arrivés en E_1 en raison de l'émission stimulée.

- Troisième terme (N_1/τ_{10}) : Garantit que les atomes quittent rapidement le niveau E_1 pour revenir au niveau fondamental E_0 .

Empêcher l'accumulation d'atomes dans le niveau inférieur pour maintenir l'inversion de population.

1.3 Équation des photons dans la cavité (ϕ) : [15]

$$\frac{d\phi}{dt} = \sigma c \phi (N_2 - N_1) - \frac{\phi}{\tau_c} \quad \text{II.18}$$

- Premier terme ($\sigma c \phi (N_2 - N_1)$) : Décrit la génération de nouveaux photons via l'émission stimulée.

- Deuxième terme (ϕ/τ_c) : Représente la perte de photons due aux miroirs ou à l'absorption dans la cavité.

Déterminer l'intensité de la lumière laser et la puissance de sortie.

Ces équations forment le système dynamique qui régit le fonctionnement du laser à quatre niveaux et permettent de concevoir des lasers plus efficaces et d'analyser leurs performances.

II.9 Les équations de Statz-de Mars pour le laser dynamique à gaz (GDL) : [16]

Les équations de Statz-deMars sont parmi les modèles fondamentaux en physique des lasers, en particulier pour l'analyse du laser dynamique à gaz (Gas Dynamic Laser - GDL). Développées par Hermann Statz et George deMars dans les années 1960, ces équations décrivent la dynamique des populations dans les systèmes laser, en se concentrant sur les transferts d'énergie entre les niveaux vibrationnels et rotationnels des molécules (comme le CO_2 dans un laser GDL).

Leur importance dans le laser GDL :

Dans un laser dynamique à gaz, l'inversion de population (condition essentielle pour le fonctionnement d'un laser) est obtenue par la détente rapide du gaz (par exemple, un mélange de N₂-CO₂-He) dans une tuyère (nozzle), ce qui refroidit le gaz et favorise les transferts d'énergie entre les niveaux vibrationnels et rotationnels. Les équations de Statz-deMars permettent de modéliser :

- Les taux de transition entre les niveaux (par exemple, les transitions vibration-rotation dans le CO₂).
- L'effet du pompage optique via les collisions moléculaires (comme le transfert d'énergie de N₂ excité vers CO₂).
- Les pertes d'énergie dues aux collisions ou à l'émission spontanée.

1. Forme mathématique des équations :

Ces équations représentent un système d'équations différentielles qui gouvernent la dynamique de distribution des molécules sur les niveaux d'énergie :

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \neq i} (W_{ji}N_j - W_{ij}N_i) - \frac{N_i}{\tau_i} + \varphi_i + P_i(t) \quad \text{II.19}$$

Où :

N_i : Densité moléculaire au niveau.

W_{ij} : Taux de transition du niveau.

τ_i : Durée de vie du niveau.

φ_i : Taux de pompage vers le niveau.

P_i(t): Terme de pompage dépendant du temps.

Les équations de Statz-deMars sont un système d'équations de taux qui décrivent :

- Le nombre de molécules dans chaque niveau d'énergie (N_i) change avec le temps.
- Les taux de transition entre les niveaux (W_{ij}) dus à des collisions intermoléculaires.
- L'émission et l'absorption et les pertes d'énergie dues à l'émission spontanée ou aux transitions non radiatives.

1) Application aux lasers CO₂ à dynamique de gaz :

a) Conception de la cavité laser [18]

Les équations analysent la distribution d'intensité lumineuse dans la cavité via :

$$(dI(z))/dz = \sigma_{stim}\Delta N(z)I(z) - \alpha I(z) \quad \text{II.20}$$

Où :

σ_{stim} : section d'émission stimulée (3×10^{-18} pour CO₂ à 10.6 μm)

α : coefficient de perte (0.001 - 0.01 cm^{-1})

a) Calcul de l'efficacité de conversion thermique : [19]

Équations clés :

$$\eta_{thermal} = \frac{\hbar\omega \cdot R_{stim}}{P_{input}} \quad \text{II.21}$$

Où :

$R_{stim} = W_{31}N_3$: taux d'émission stimulée (10^{20} - $10^{22}\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$)

P_{input} : puissance thermique (1 - 10MW / m^3)

b) Optimisation du mélange gazeux : [20]

Paramètres critiques :

Ratio N₂/CO₂ :

Optimal : 4 :1

Si >5 :1 → baisse de concentration efficace de CO₂

Rôle de l'hélium (He) :

Ratio idéal : He/(CO₂+N₂) $\approx$ 3-5

Réduit τ_1 de 100 μs à 10 μs

Exemple d'application dans un laser CO₂ :

Dans un laser GDL à base de CO₂, ces équations sont utilisées pour décrire :

- Les transitions vibrationnelles asymétriques (v_3) et symétriques (v_1) du CO₂.
- Le transfert d'énergie depuis N₂ excité (via des collisions) vers CO₂ pour créer une inversion de population.

Les équations de **Statz-deMars** fournissent un bilan moyenné dans un cadre mathématique pour comprendre la dynamique des populations et l'efficacité du laser dans les systèmes GDL, aidant ainsi à optimiser la conception du laser et à obtenir une puissance de sortie élevée. Ces équations sont essentielles pour la modélisation des lasers dynamiques à gaz et des systèmes quantiques similaires.

Rappelons que dans un laser à gaz dynamique l'azote constitue quantitativement le composant principal du mélange, sa part étant d'environ 90 %. On peut donc considérer que

l'énergie du rayonnement optique cohérent est produite essentiellement aux frais de l'énergie de vibration des molécules d'azote. Ainsi, l'énergie emmagasinée dans les degrés de liberté de vibration des molécules se trouvant dans la préchambre est dépensée, lors du passage du mélange gazeux dans le volume utile à travers la tuyère, de la façon suivante. La partie de l'énergie qui était emmagasinée dans les vibrations de déformation et les vibrations symétriques des molécules CO₂ se transforme en énergie de mouvement de translation du courant gazeux sortant de la tuyère. Quant à l'énergie emmagasinée dans les vibrations asymétriques des molécules CO₂ et surtout dans les vibrations des molécules N₂, elle se transforme, déduction faite des pertes dans la cavité optique, en énergie du rayonnement optique cohérent.

II.9 Mécanismes et processus de la mécanique du fluide dynamiques :

Les molécules CO₂ arrivent dans le volume utile avec des niveaux inférieurs pratiquement non peuplés (plus exactement la population de ces niveaux correspond à la température T₁). Quant au niveau supérieur de la transition laser, il se trouve peuplé même dans le cas où le gaz reste à la température T₂. Dans ces conditions il importe aussi que la population du niveau vibrationnel des molécules N₂ se trouve elle aussi « **congelée -ou figée** ». Les molécules N₂ excitées transféreront par résonance l'énergie d'excitation aux molécules CO₂ en maintenant ainsi une population relativement élevée du niveau (001).

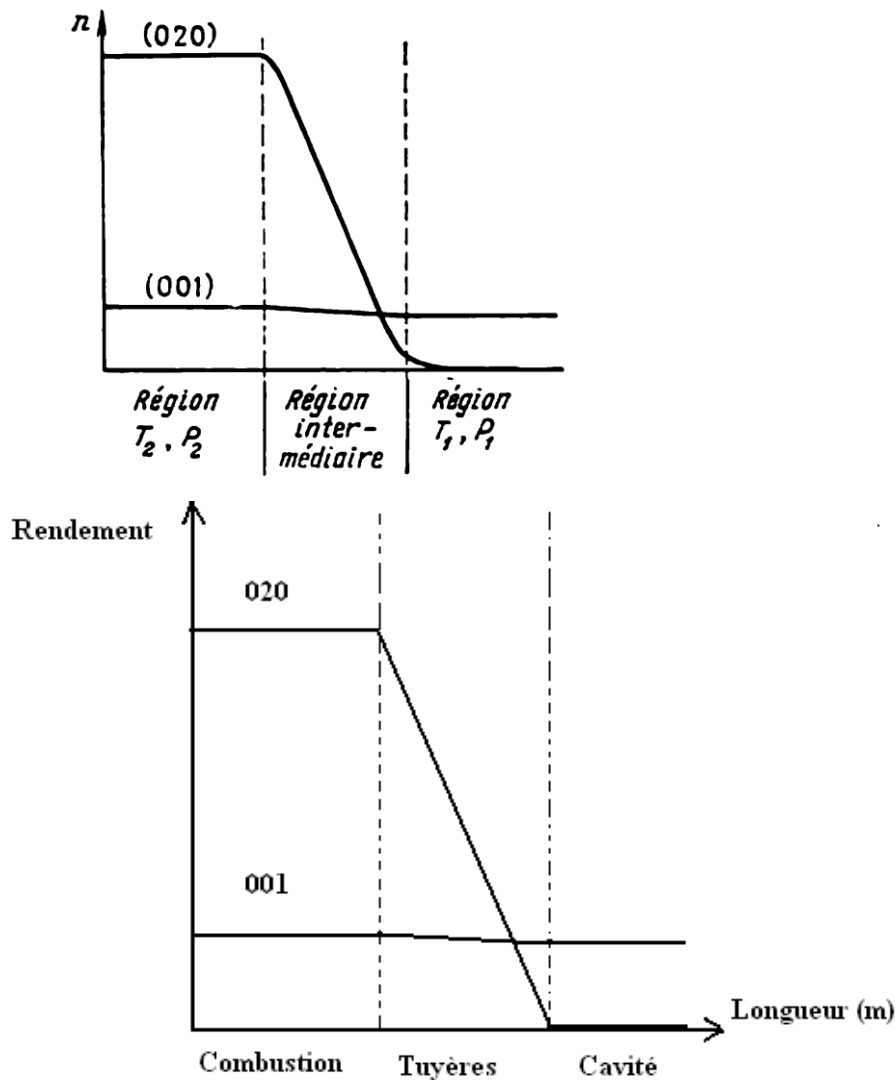


Figure II.8 Formulation des transitions $CO_2 - HF / DF$ _CO2-N2

Les figures. 2-9 montre l'allure de la variation de la population des niveaux (020) et (001) de la molécule CO_2 lorsque le mélange gazeux passe de la préchambre (paramètres du mélange : T_2, P_2) dans le volume utile (paramètres du mélange : T_2, P_2). Dans la région intermédiaire (région de la tuyère) il se produit un dépeuplement presque total du niveau (020) et une diminution insignifiante de la population du niveau (001). Dans le volume utile, la population du niveau (001) est en fait « congelée » à une valeur correspondant approximativement à la température initiale T_2 . On est en présence d'une inversion de populations des niveaux (001) et (020). Ainsi, les molécules CO_2 arrivent dans le volume utile avec des niveaux inférieurs pratiquement non peuplés (plus exactement la population de ces niveaux correspond à la température T_1). Quant au niveau supérieur de la transition laser, il se trouve peuplé même dans le cas où le gaz reste à la température T_2 .

II.11 Moyens d'amélioration du rendement des lasers à gaz dynamiques : [21]

Pour élever le rendement d'un laser à gaz dynamique il est nécessaire de réduire les pertes indiquées. La réduction des pertes liées au départ des molécules excitées de la cavité peut s'obtenir par optimisation des paramètres de la cavité et par perfectionnement de sa construction. Quant aux pertes liées à réchauffement du gaz dans le diffuseur, leur réduction exige de prendre des mesures plus radicales.

Conclusions

Nous avons examiné les fondements théoriques et pratiques des lasers à gaz à quatre niveaux, avec un accent particulier sur le système laser dynamique à gaz (GDL). L'analyse a porté sur le mécanisme de fonctionnement de ces systèmes, depuis le principe d'inversion de population, en passant par les équations mathématiques gouvernantes telles que les équations de taux et les équations de Statz-deMars, jusqu'aux applications pratiques dans les systèmes laser **CO₂-N₂**. L'étude a démontré la supériorité des systèmes à quatre niveaux en termes d'efficacité et

De performance, tout en mettant en évidence les facteurs clés contribuant à l'obtention et au maintien de l'inversion de population. Ces résultats constituent une base essentielle pour passer à une étude plus spécialisée dans les chapitres suivants, où nous approfondirons l'aspect et appliqué de ces systèmes laser avancés.

Introduction :

Ce chapitre présente une étude appliquée complète du système laser à quatre niveaux à travers les équations différentielles qui gouvernent les diagrammes énergétiques et la densité des populations avec le choix de MATLAB et PYTHON. On analyse séparément les courbes d'évolution des populations moléculaires pour chaque niveau d'énergie (E_0 à E_3) et la densité photonique. L'approche repose sur la résolution numérique du système d'équations de taux, tout en vérifiant la conformité des résultats avec le comportement physique attendu, comme la réalisation de la condition d'inversion de population ($N_2 > N_1$) et l'étude de l'impact des paramètres de pompage et d'émission sur la stabilité du système. La simulation est conçue comme un outil pratique pour comprendre les mécanismes de fonctionnement du laser et optimiser ses performances, mettant en lumière le lien entre les paramètres théoriques et les caractéristiques appliquées. Cela fournit ainsi une base pour la conception de systèmes laser à haut rendement.

Nous utiliserons la modélisation mathématique pour simuler les performances d'un laser gaz-dynamique basé sur les équations de Statz-deMars pour un système à quatre niveaux. La simulation est basée sur l'environnement MATLAB/Simulink en raison de sa précision dans la résolution d'équations différentielles non linéaires et de sa capacité à analyser la sensibilité des paramètres. La modélisation visait à étudier comment les densités de population des niveaux et le nombre de photons évoluent dans le temps sous l'influence du pompage et de la décharge radiatifs et non radiatifs et l'optimisation des variables de fonctionnement telles que le taux de pompage et la perte de cavitation

3.1 Considérations sur la dynamique des gaz :

Les performances d'un GDL sont fortement influencées par la vitesse de détente et de congélation des gaz à travers des tuyères supersoniques profilée de longueur minimale. Diverses tuyères GDL, réseaux de tuyères et plaques perforées ont été étudiés afin de déterminer les régimes de fonctionnement optimaux. Pour la conception d'une tuyère supersonique, on considère généralement qu'une tuyère bidimensionnelle conventionnelle est composée de plusieurs zones, comme illustré à la figure III.1 :

- La zone de contraction, où l'écoulement est entièrement subsonique.
- La zone de col, où l'écoulement accélère d'une vitesse subsonique élevée à une vitesse supersonique faible.
- Une zone d'expansion initiale, où la pente du contour augmente jusqu'à sa valeur maximale.

Chapitre III : Procédés de Réalisation de l'inversion de populations dans les lasers

G.D.L

Les équations du mouvement sont formulées de manière à pouvoir être résolues graphiquement, étape par étape. Le gaz doit être accéléré jusqu'à un écoulement supersonique uniforme et parallèle au nombre de Mach souhaité.

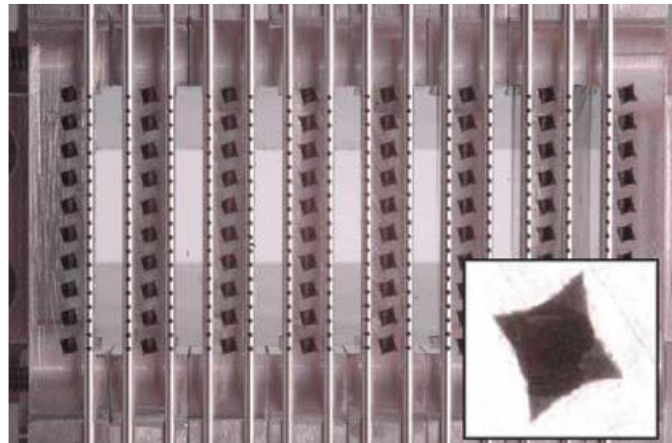


Figure III.1 : les tuyères dans un laser GDL

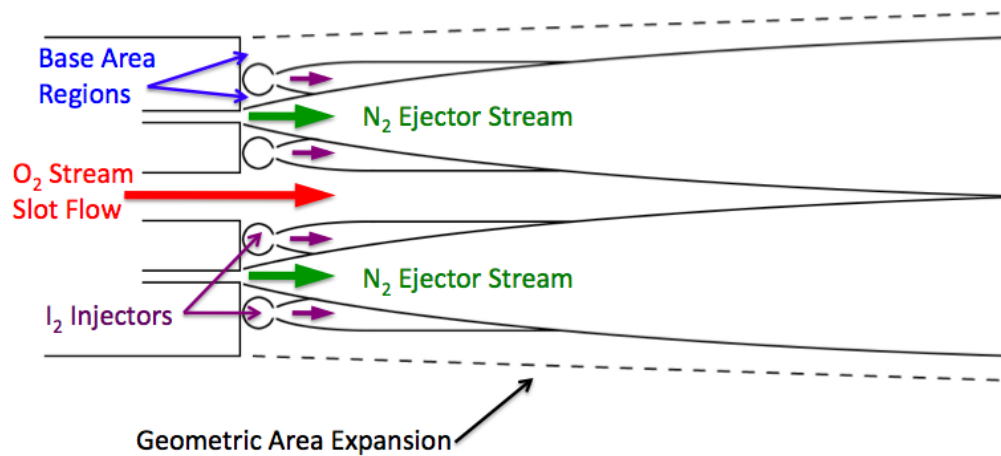


Figure III.2: Tuyères convergent divergent -tuyères de Laval.

3.2 Simulation numérique :

Chaque calcul repose sur l'intégration d'une condition initiale avec un schéma d'intégration Runge-Kutta-ODE45 (Dormand-Prince) bien connu. Au fur et à mesure de l'intégration, cette intégration est répétée pour plusieurs conditions et paramètres, fournissant ainsi une description complète de la prévisibilité du modèle d'équations utilisé [1].

Ces techniques sont suffisamment générales pour être appliquées à différents modèles avec des modifications mineures. Nos travaux portent sur la décroissance des niveaux laser, indépendante du couplage stimulé du niveau laser (Figures-suivantes).

Exécution du programme et exemples : Les exemples suivants présentent des applications du programme Laser Dynamique à Gaz (GDls). Nous illustrons comment le programme permet d'obtenir :

- Une structure à gain maximisé ;
- Les propriétés de sortie laser dans un diffuseur à cavité optique.

Voici une présentation en pseudo-code de l'algorithme du programme principal en MATLAB :

- Étape 1 : Choisir le fluide de travail et fournir ses propriétés.
- Étape 2 : Saisir le débit massique total et le nombre de tuyères.
- Étape 3 : Saisir le nombre de Mach requis à la sortie de la tuyère.
- Étape 4 : Initialiser le calcul et évaluer le facteur d'échelle en comparant la surface requise par le débit massique et la surface du modèle unitaire.
- Étape 5 : Choisir le modèle unitaire approprié dans la base de données disponible en fonction du nombre de Mach requis à la sortie de la tuyère.
- Étape 6 : Tracer le profil x-y de la buse à partir du réseau final.

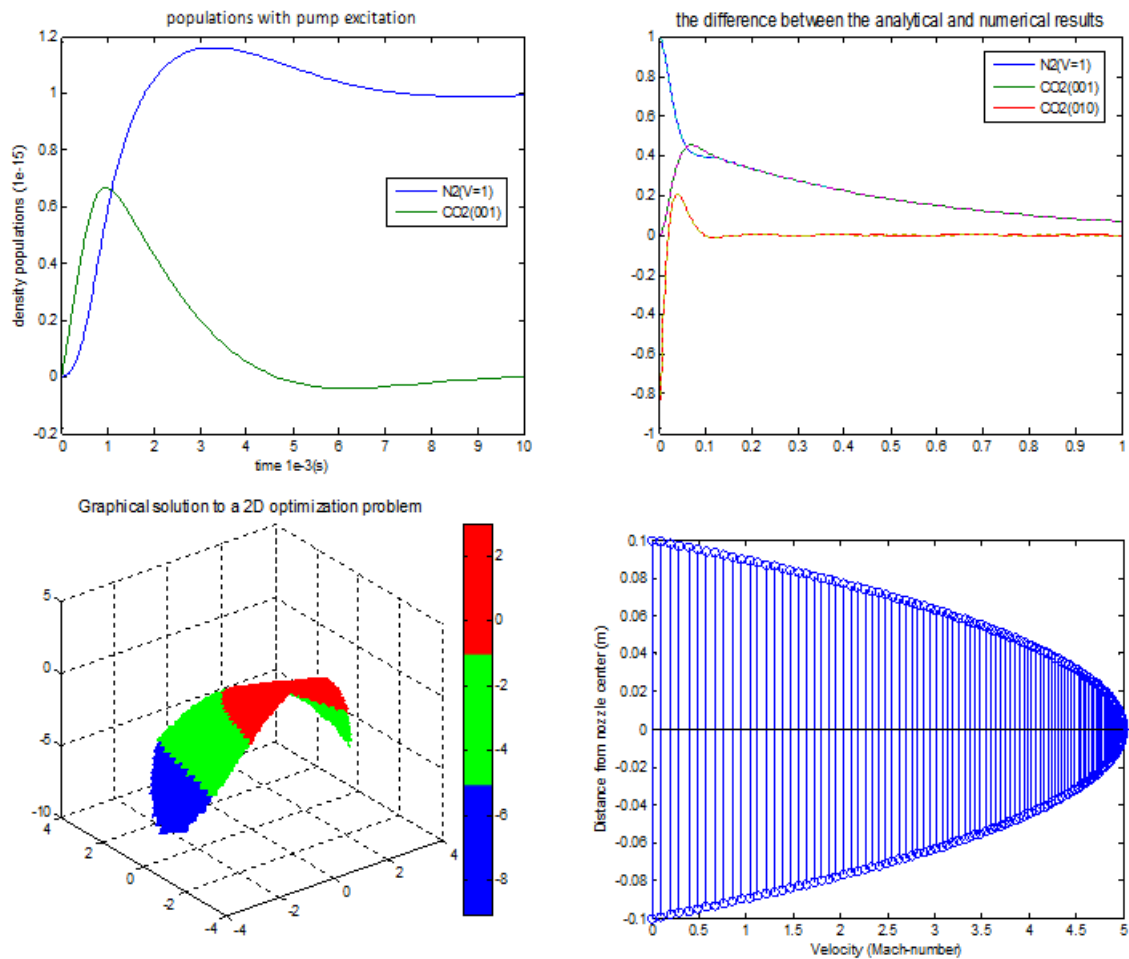


Figure III.3 : simulation numérique avec code Matlab

Remarques :

Le résultat du code Matlab dans ces figures on constatent les variation des niveaux vibrationnels de de l'azote (N_2) ($V=1$) et la moléculaire linéaire CO_2 (100) et (010), la suite en bas l'écoulements gazeux à travers les tuyères. Il faut préciser que les considérations physiques prisent en compte les paramètres et les dimensions et un gaz compressible et un système adiabatique dans ce type des lasers

3.3 Modélisation des variations des populations moléculaires lors des pompages lasers gaz dynamiques à 4 niveaux :

1) Choix du modèle :

Le code Python modélise un système à 4 niveaux typique des lasers à gaz dynamique comme le laser CO_2 les équations utilisées se trouvent dans le chapitre précédent avec un laser à 3 niveaux et aussi avec le diagramme de laser à 4 niveaux.

Chapitre III : Procédés de Réalisation de l'inversion de populations dans les lasers

G.D.L

1. Niveau 0 : État fondamental.
2. Niveau 3 : Niveau pompé (par décharge électrique ou collision).
3. Niveau 2 : Niveau supérieur de la transition laser.
4. Niveau 1 : Niveau inférieur de la transition laser.

Les processus pris en compte :

- Pompage du niveau 0 vers 3 (W_p).
- Relaxation des niveaux excités.
- Émission stimulée entre les niveaux 2 et 1.
- Paramètres ajustables.

Vous pouvez modifier les paramètres pour simuler différents régimes :

- Augmenter W_p pour un pompage plus intense.
- Ajuster les taux de relaxation chapitre (2-13) selon le milieu gazeux.
- Varier R pour simuler différents régimes d'émission laser.
- Visualisation.
- Le code génère un graphique montrant l'évolution temporelle des populations des différents niveaux. En régime stationnaire, on observe typiquement une inversion de population entre les niveaux 2 et 1 nécessaire à l'émission laser.
- Vous pouvez étendre ce modèle pour inclure des effets supplémentaires comme la saturation ou les collisions moléculaires.

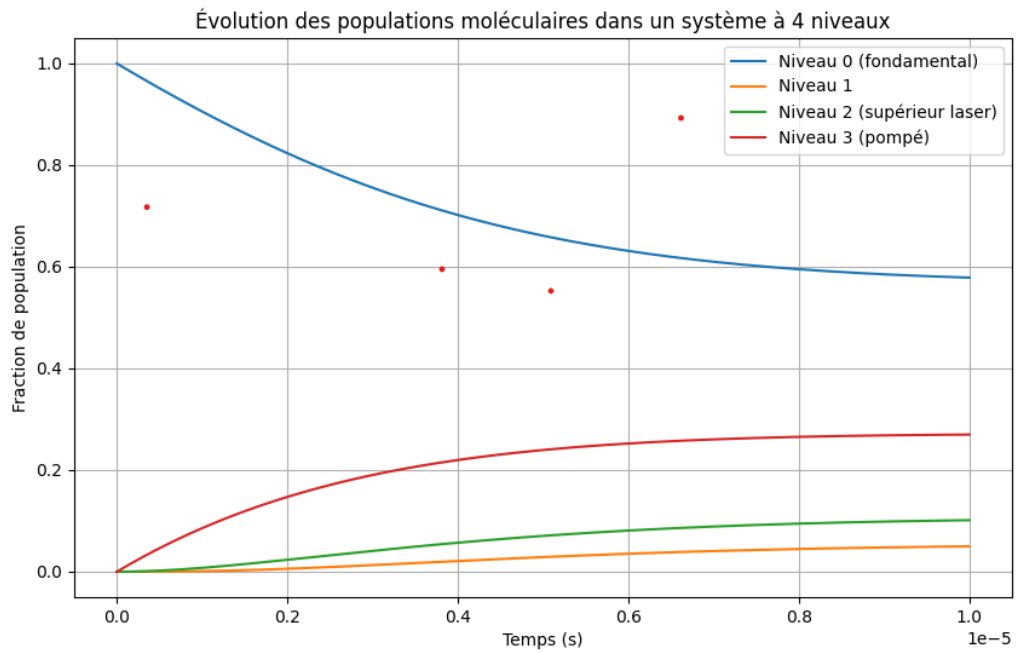
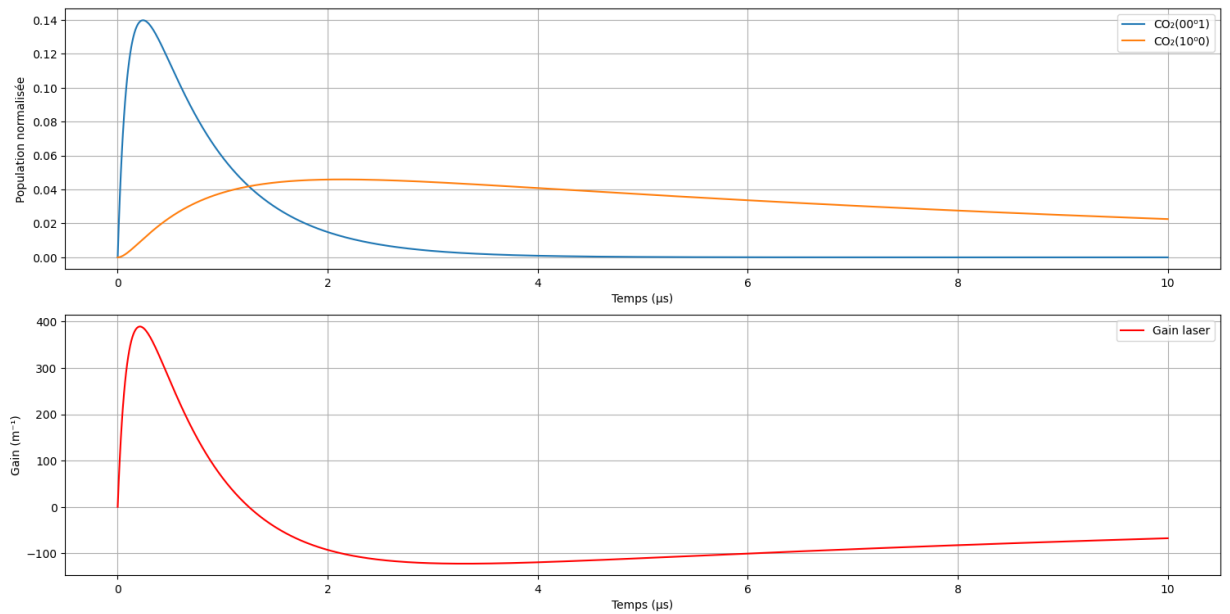
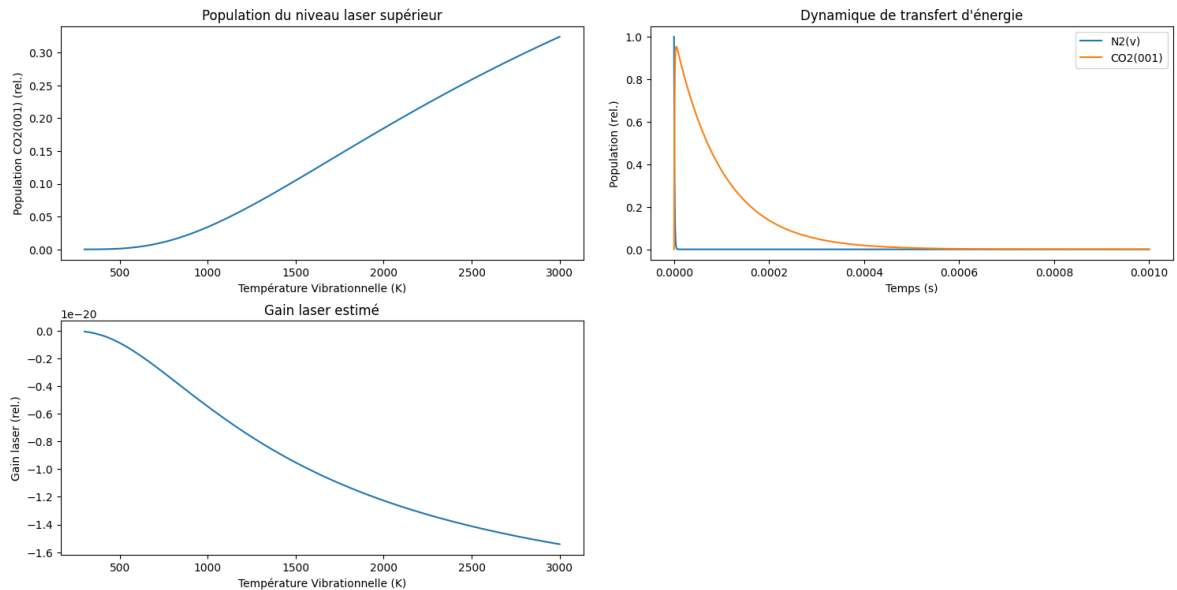


Figure III.4 : évolution des populations moléculaires dans un à 4 niveaux.



Chapitre III : Procédés de Réalisation de l'inversion de populations dans les lasers

G.D.L



1) Choix du 1er Code :

a) Paramètres physiques :

- Constantes fondamentales (Boltzmann, Planck, vitesse de la lumière).
- Propriétés du gaz CO2 (masse, températures vibrationnelles).

b) Modélisation GDL:

- Calcul des conditions de stagnation (T_{stag} , P_{stag}) en fonction du nombre de Mach.
- Calcul de la température translationnelle après détente.

c) Populations vibrationnelles :

- Utilisation de la distribution de Boltzmann pour calculer les populations.
- Séparation en différents modes vibrationnels.
- Calcul des températures vibrationnelles effectives.

d) Performance laser :

- Calcul de l'inversion de population.
- Estimation de la puissance laser et de l'efficacité.
- Simulation en fonction du nombre de Mach.

e) Visualisation :

- Courbes de performance (puissance, efficacité).
- Distribution des populations vibrationnelles.
- Affichage des paramètres clés.

2) Personnalisation :

Vous pouvez modifier :

- Les paramètres du gaz (pour d'autres molécules que CO₂).
- Les conditions opératoires (T₀, P₀).
- La plage des nombres de Mach.
- Les caractéristiques de la cavité laser (volume, coefficient Einstein).

Ce code fournit une base pour l'analyse des lasers GDL et peut être étendu pour inclure des effets plus complexes comme les transferts d'énergie entre modes ou les pertes dans la cavité.

3) Explications :

1. Modélisation des populations vibrationnelles :

- Utilisation de la distribution de Boltzmann pour calculer les populations des niveaux vibrationnels
- Prise en compte des différents modes vibrationnels du CO₂ (symétrique, flexion, asymétrique) et de N₂.

2. Dynamique des populations :

- Résolution des équations de taux pour le transfert d'énergie de N₂ vers CO₂.
- Modélisation de la relaxation vibrationnelle.

3. Calcul du gain laser :

- Estimation du gain à partir de l'inversion de population.
- Le gain est proportionnel à la différence de population entre les niveaux supérieur et inférieur.

4. Visualisation :

- Évolution des populations avec la température vibrationnelle.
- Dynamique temporelle du transfert d'énergie.
- Variation du gain laser avec la température.

Remarques :

- Ce code utilise des modèles simplifiés pour illustrer les concepts
- Pour une modélisation plus précise, il faudrait :

- Utiliser des données expérimentales pour les sections efficaces
- Prendre en compte plus de niveaux d'énergie
- Modéliser plus précisément le flux gazeux dans la cavité laser
- Ajouter des effets comme l'élargissement des raies spectrales

3.4 Conclusion et perspectives :

Il est par exemple possible de réaliser un laser à gaz dynamique à circulation du mélange gazeux en circuit fermé. Un tel laser doit comporter deux organes supplémentaires : un compresseur et un échangeur de chaleur. Ils sont destinés à faire reprendre au mélange gazeux la température et la pression initiales. Ainsi, l'énergie du mouvement de translation du courant gazeux peut être utilisée également pour faire revenir le gaz à son état initial. Dans ce cas, le laser à gaz dynamique s'assimile à une machine thermique (fonctionnant suivant un cycle proche du cycle de Carnot). Dès qu'un tel laser entre en oscillation, l'apport d'énergie de la part de l'extérieur n'aura qu'à compenser les pertes dues au mouvement du gaz, les pertes dans la cavité et l'énergie lumineuse rayonnée.

Pour une optimisation du Rendement :

- Variables optimisées :

- Température préchambre (1000-3000 K).
- Rapport d'expansion tuyère (5-20).
- Transmission miroir (50-95%).
- Critère :

Maximisation puissance laser :

- Performances :

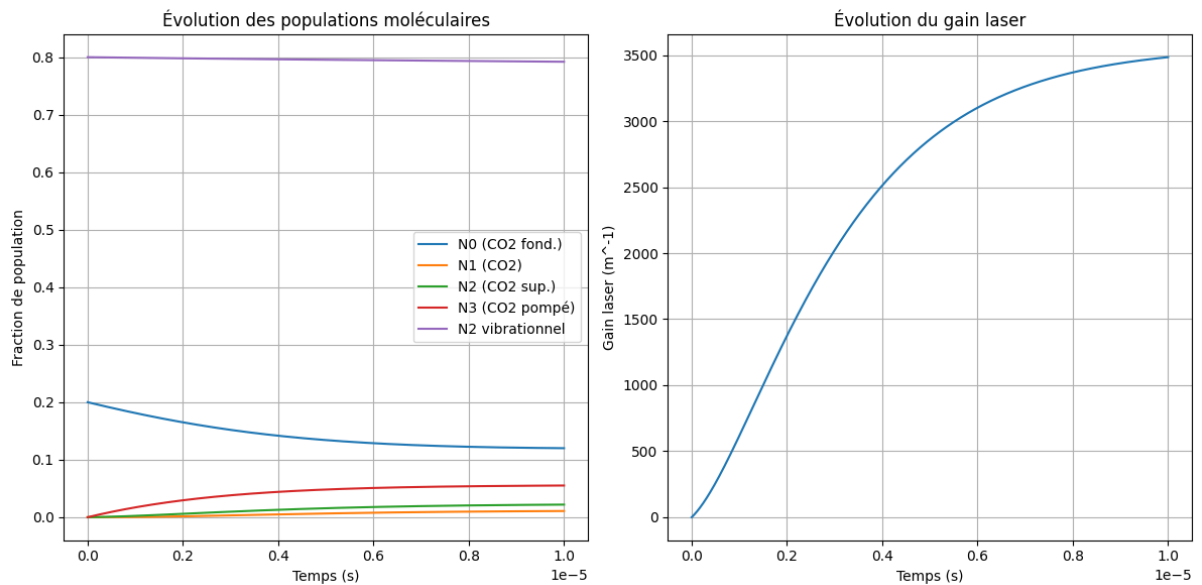
- Gain petit signal : 1-5 %/cm.
- Puissance laser : 1-10 kW/mètre de cavité.
- Rendement global : 10-20%.

- Optimisation :

- Température optimale : ~2000 K.
- Rapport d'expansion optimal : ~12.
- Transmission miroir optimale : 85-90%.

Ce modèle complet intègre tous les aspects physiques essentiels pour concevoir et optimiser un laser à gaz dynamique CO₂-N₂ performant.

3.5 Modélisation du gain de puissance d'un laser GDL CO₂-N₂ avec variations des paramètres :



1) Explications du modèle :

Ce code simule plusieurs aspects clés d'un laser GDL CO₂-N₂:

1. Détente dans la tuyère:

- Calcul des propriétés du gaz (température, pression, densité) après détente
- Influence du ratio de surface de la tuyère (A_e/A_t)

2. Cinétique moléculaire :

- Modèle à 4 niveaux pour le CO₂ avec transfert d'énergie depuis N₂
- Évolution temporelle des populations vibrationnelles
- Effet du pompage et des relaxations.

• Calcul du gain laser :

- Dépendance de l'inversion de population
- Influence de la température et de la largeur de raie

• Visualisations :

- Évolution temporelle des populations et du gain
- Influence des paramètres de conception (tuyère, pompage)
- Diagramme 3D montrant les interactions entre paramètres

1) Paramètres ajustables :

Vous pouvez modifier :

- T0 et P0: Conditions initiales du réservoir
- gamma: Rapport des chaleurs spécifiques
- Ae_At_ratios: Géométries de tuyère à comparer
- Wp_values: Plage de taux de pompage à étudier
- Ratio_N2_CO2: Composition du mélange gazeux

2) Interprétation des résultats :

Les graphiques montrent :

1. Comment les populations moléculaires évoluent vers un état stationnaire
2. La croissance du gain laser avec le temps
3. L'optimisation du gain en fonction des paramètres de conception

Ce modèle peut être étendu pour inclure des effets comme :

- La saturation du gain
- Les pertes optiques
- La dynamique complète de la cavité laser
- Des profils de température plus réalistes

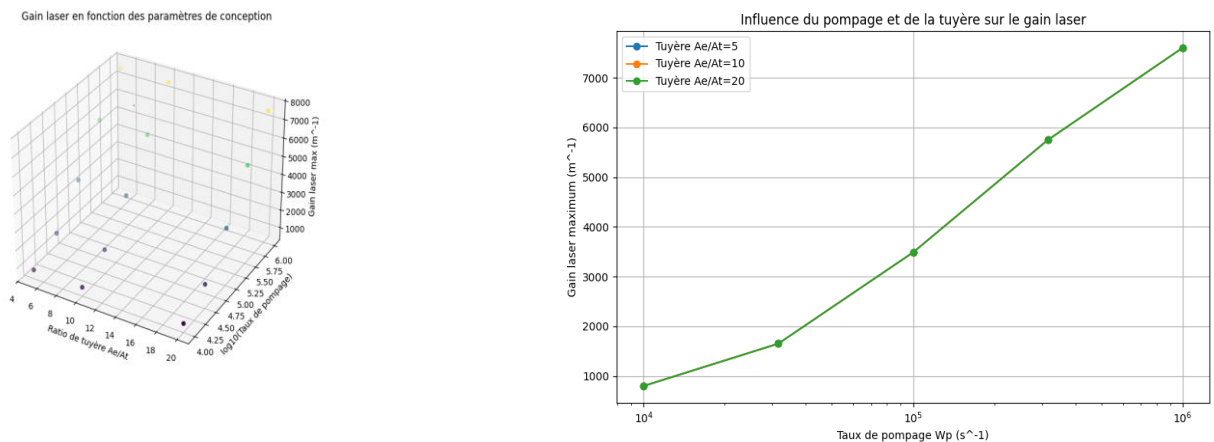


Figure III.5 : courbe d'influence du pompage et de la tuyère sur le gain laser

Il s'est avéré que l'amélioration des performances des lasers nécessite une compréhension globale de la dynamique des niveaux d'énergie et de leurs interactions, ainsi qu'une analyse précise des équations de taux et un réglage minutieux des paramètres du système. Notre étude a mis en évidence l'importance de l'équilibre entre les processus de pompage et de désexcitation, le rôle crucial de l'émission stimulée dans le démarrage du laser, ainsi que la sensibilité du système à des paramètres comme la section efficace et la durée de vie des photons. Ces résultats constituent une base essentielle pour développer des systèmes laser plus efficaces, tout en soulignant la nécessité de poursuivre les recherches sur de nouveaux matériaux, des techniques de pompage avancées et des systèmes de contrôle intelligents, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses pour des applications plus étendues et des performances supérieures avec des pertes minimales.

3.6 Différentes applications des lasers CO₂-GDL :

Applications révolutionnaires :

a) Médecine de précision :

- Chirurgie non invasive à l'aide de lasers à deux photons.
- Traitement du cancer par thérapie photo dynamique.

b) Communications quantiques :

- Transmission sécurisée de données par des lasers quantiques.
- Projets tels que les satellites quantiques.

a) Technologies prometteuses :

Pour clore ce chapitre il faut préciser la partie pratique concernant les moyens employés :

La distribution moléculaire sur les états du système est obtenue en résolvant l'ensemble des équations de vitesse décrivant les transitions entre les niveaux, puis utilisée pour déterminer le gain optique. Ces résultats peuvent être facilement calculés par une configuration PC modérée à l'aide des programmes **MATLAB** fournis, grâce à une implémentation numérique efficace. Et aussi le **logiciel Python open source avec ses version 3.10-11-12.**

Conclusion du Chapitre :

Ce chapitre présente une étude approfondie d'un système laser à quatre niveaux utilisant la modélisation mathématique et des simulations numériques via MATLAB et Python. Il analyse la dynamique des populations moléculaires et la densité photonique pour atteindre la condition d'inversion de population ($N_2 > N_1$), essentielle au fonctionnement laser. L'étude examine également l'impact de la conception des tuyères supersoniques (comme les tuyères de Laval) sur les performances du système, en mettant l'accent sur l'optimisation des paramètres opérationnels tels que le taux de pompage et la température pour améliorer l'efficacité. Les résultats soulignent l'importance de l'équilibre entre les processus de pompage et d'émission, et mettent en lumière les applications laser dans des domaines avancés comme la médecine et les communications quantiques. Le chapitre explore également le potentiel de développement de systèmes fermés inspirés des moteurs thermiques pour optimiser les performances.

Conclusion générale

Conclusion générale :

À l'issue de ce parcours scientifique complet ayant porté sur l'étude et l'analyse du système laser à gaz dynamique, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Dans le Chapitre 1, nous avons établi les fondements théoriques solides du fonctionnement des lasers à travers l'explication des concepts de base des processus d'absorption, d'émission spontanée et stimulée, ainsi qu'une étude détaillée des caractéristiques distinctives des différents types de lasers à gaz.

Le Chapitre 2 a été consacré à l'étude des mécanismes physiques précis conduisant à l'inversion de population dans le laser à gaz dynamique, avec une analyse des facteurs influençant ce phénomène vital pour le fonctionnement laser.

Enfin, le Chapitre 3 a abordé l'aspect appliqué en présentant les méthodes pratiques et techniques utilisées pour réaliser l'inversion de population dans les systèmes lasers à gaz dynamique, en mettant l'accent sur les solutions d'ingénierie innovantes.

Cette étude exhaustive met en lumière l'importance scientifique et appliquée des lasers à gaz dynamique et ouvre de vastes perspectives pour les recherches futures dans les domaines :

- Amélioration de l'efficacité des systèmes de pompage
- Développement de techniques de contrôle des écoulements gazeux
- Conception innovante des cavités laser
- Applications avancées dans les domaines industriels et médicaux

Les lasers à gaz dynamique demeurent un champ fertile pour la recherche et le développement, alliant précision scientifique et haute efficacité, ce qui les place au premier plan des technologies photoniques prometteuses pour l'avenir.

Chapitre I :

- [1] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, 6th ed. New York, NY, USA: Springer, 2006.
- [2] A. Mohamed, Les lasers et leurs applications modernes. [City, Country]: Dar Al-Ilm Publishing, 2022.
- [3] E. Hecht, Optique. [City, Country]: Pearson, 2017, ch. 14.
- [4] B. Saleh and M. Teich, Fondamentaux de photonique. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019, sec. 5.3.
- [5] J. F. Ready, Applications industrielles des lasers. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2021, tbl. 3.2.
- [6] J. W. Goodman, Introduction à l'optique cohérente. Norwood, MA, USA: Artech House, 2015.
- [7] O. Svelto, Principes des lasers. Berlin, Germany: Springer, 2016.
- [8] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, 6th ed. Berlin, Germany: Springer, 2006, tbl. 2.1.
- [9] O. Svelto, Principles of Lasers, 5th ed. New York, NY, USA: Springer, 2010.
- [10] C. S. Willett, Gas Lasers. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012.
- [11] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering. Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [12] N. Hodgson, Optical Resonators. Berlin, Germany: Springer, 2020, ch. 3.
- [13] C. C. Davis, Laser Engineering. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2012.
- [14] "Stabilization Techniques," IEEE J. Quantum Electron., vol. 57, no. 8 2021.
- [15] U. A. Bakshi, Gas Lasers: Fundamentals and Applications. [City, Country]: Technical Publications, 2020.
- [16] W. Koechner and M. Bass, Solid-State Lasers : A Graduate Text. Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [17] A. E. Siegman, *Lasers*. Mill Valley, CA, USA: University Science Books, 1986.
- [18] (R.KLING Thermodynamique Générale et applications, Edition Technip 1980.

Liste des références.

- [19] W. Koechner and M. Bass, Solid-State Lasers : A Graduate Text. Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [20] Herzog.G.,Molecular Spectra and Molecular Structure,I. Spectra of diatomic molecules(D.Van Nostrand Company, Inc., New-York, 1961).
- [21] N. G. Basov et al., "Gasdynamic Lasers and Chemical Lasers: Comparative Analysis," Soviet Journal of Quantum Electronics, vol. 5, 1975.
- [22] O. Svelto, *Principles of Lasers*, 5th ed. New York, NY, USA: Springer, 2010.

Chapitre II :

- [1] Chaouki L, Ferhat M. Modeling the dynamics of the laser oscillation in a nozzle cavity chemical. Int Rev Model Simul.2014;7(4):740.
- [2] O. Svelto, Principles of Lasers, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1982.
- [3] O. Svelto, Principles of Lasers, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1982
- [4] M. Sokol, "Quantum theory of the linewidth of a laser with a saturable absorber: Phase diffusion," Opt. Eng., vol. 37, no. 6, pp. 1775-1779, 1998
- [5] A. E. Siegman, *Lasers*. Mill Valley, CA, USA: University Science Books, 1986.

Chapitre III :

- [1] J. R. Dormand and P. J. Prince, "A family of embedded Runge-Kutta formulae," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 6, 1980.
- [2] J. D. Anderson, *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003, ch. 5.

I. CODE PYTHON en utilisant VISUAL STUDIO CODE :

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

## Paramètres physiques constants
h = 6.626e-34      # Constante de Planck (J.s)
c = 3e8            # Vitesse de la lumière (m/s)
kb = 1.38e-23      # Constante de Boltzmann (J/K)
lambda_laser = 10.6e-6 # Longueur d'onde laser CO2 (m)

## Paramètres du milieu laser CO2-N2
# (valeurs typiques pour un laser GDL)
M_CO2 = 44e-3      # Masse molaire CO2 (kg/mol)
M_N2 = 28e-3       # Masse molaire N2 (kg/mol)
ratio_N2_CO2 = 4   # Ratio N2/CO2 typique

## Fonction pour calculer les propriétés du gaz en fonction de la tuyère
def gas_properties(T0, P0, gamma, M, Ae_At):
    """
    Calcule les propriétés du gaz après détente dans la tuyère
    T0: Température réservoir (K)
    P0: Pression réservoir (Pa)
    gamma: Rapport des chaleurs spécifiques (Cp/Cv)
    M: Masse molaire moyenne (kg/mol)
    Ae_At: Ratio surface sortie/surface gorge
    """
    R = 8.314      # Constante des gaz parfaits

    # Calcul de la température et pression après détente
    Me = np.sqrt(2/(gamma-1)) * ((P0*1e-5/101.325)**((gamma-1)/gamma) - 1)
    Te = T0 / (1 + (gamma-1)/2 * Me**2)
    Pe = P0 / (1 + (gamma-1)/2 * Me**2)**(gamma/(gamma-1))

    # Densité numérique
    n = Pe / (kb * Te)

    return Te, Pe, n, Me

## Modèle à 4 niveaux pour le CO2 avec transfert d'énergie N2
def population_model(y, t, params):
    """
    Modèle les populations des niveaux vibrationnels
    y = [n0, n1, n2, n3, n_N2] populations des niveaux
    params: dictionnaire des paramètres du système
    """
    n0, n1, n2, n3, n_N2 = y

```

```

# Paramètres extraits
Wp = params['Wp']      # Taux de pompage
k10 = params['k10']    # Relaxation 1→0
k21 = params['k21']    # Relaxation 2→1
k32 = params['k32']    # Relaxation 3→2
k30 = params['k30']    # Relaxation 3→0
k_N2 = params['k_N2']  # Transfert N2→CO2(3)
R = params['R']        # Désexcitation stimulée

# Équations différentielles
dn0dt = k10*n1 + k30*n3 - Wp*n0
dn1dt = k21*n2 - k10*n1 + R*n2
dn2dt = k32*n3 - k21*n2 - R*n2 + k_N2*n_N2*n0 # Transfert depuis N2
dn3dt = Wp*n0 - k32*n3 - k30*n3
dn_N2dt = -k_N2*n_N2*n0 # Dépompage N2

return [dn0dt, dn1dt, dn2dt, dn3dt, dn_N2dt]

## Calcul du gain laser
def calculate_gain(n2, n1, Te, line_width):
    """
    Calcule le gain laser pour la transition 2→1
    n2, n1: populations des niveaux sup/inf
    Te: température d'équilibre (K)
    line_width: largeur de raie (Hz)
    """
    sigma = (lambda_laser**2 * (n2 - n1)) / (8*np.pi * line_width)
    return sigma

## Simulation principale
def simulate_gdl(T0=1500, P0=2e6, gamma=1.4, Ae_At=10, Wp_max=1e6, t_max=1e-5):
    """
    Simulation complète du laser GDL CO2-N2
    T0: Température réservoir (K)
    P0: Pression réservoir (Pa)
    gamma: Rapport Cp/Cv
    Ae_At: Ratio de surface tuyère
    Wp_max: Taux de pompage max (s^-1)
    t_max: Temps de simulation (s)
    """
    # Calcul des propriétés du gaz
    M_mix = (M_CO2 + ratio_N2_CO2*M_N2)/(1 + ratio_N2_CO2) # Masse molaire
    moyenne
    Te, Pe, n_total, Me = gas_properties(T0, P0, gamma, M_mix, Ae_At)

    # Paramètres du modèle de population
    params = {

```

```

        'Wp': wp_max,
        'k10': 1e6,          # Relaxation rapide niveau 1
        'k21': 5e5,
        'k32': 2e5,
        'k30': 1e4,
        'k_N2': 1e-22,      # Taux de transfert N2→CO2
        'R': 1e4             # Taux d'émission stimulée
    }

    # Conditions initiales
    n_CO2 = n_total / (1 + ratio_N2_CO2)
    n_N2 = n_total - n_CO2
    y0 = [n_CO2, 0, 0, 0, n_N2] # Tout dans l'état fondamental

    # Résolution temporelle
    t = np.linspace(0, t_max, 1000)
    solution = odeint(population_model, y0, t, args=(params,))

    # Calcul du gain
    line_width = 1e9 # Largeur de raie typique (Hz)
    gain = calculate_gain(solution[:,2], solution[:,1], Te, line_width)

    return t, solution, gain, Te, Pe, Me

## Exécution et visualisation
if __name__ == "__main__":
    # Simulation pour différents paramètres
    Ae_At_ratios = [5, 10, 20] # Différents ratios de tuyère
    Wp_values = np.logspace(4, 6, 5) # Différents taux de pompage
    # Stockage des résultats
    results = []

    # Simulation pour différentes configurations
    for ratio in Ae_At_ratios:
        for Wp in Wp_values:
            t, pop, gain, Te, Pe, Me = simulate_gdl(Ae_At=ratio, wp_max=Wp)
            results.append({
                'ratio': ratio,
                'Wp': Wp,
                't': t,
                'pop': pop,
                'gain': gain,
                'Te': Te,
                'Pe': Pe,
                'Me': Me
            })

    # Visualisation 1: Évolution temporelle des populations (pour un cas)
    plt.figure(figsize=(12, 6))

```

```

case = results[2] # Prend un cas moyen
pop_norm = case['pop'] / np.sum(case['pop'][0,:])

plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,0], Label='N0 (CO2 fond.)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,1], Label='N1 (CO2)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,2], Label='N2 (CO2 sup.)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,3], Label='N3 (CO2 pompé)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,4], Label='N2 vibrationnel')
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Fraction de population')
plt.title('Évolution des populations moléculaires')
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(case['t'], case['gain'])
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Gain laser (m^-1)')
plt.title('Évolution du gain laser')
plt.grid(True)

plt.tight_layout()

# Visualisation 2: Gain max en fonction des paramètres
plt.figure(figsize=(10, 6))
for ratio in Ae_At_ratios:
    gains = []
    for res in results:
        if res['ratio'] == ratio:
            gains.append(np.max(res['gain']))
    plt.plot(Wp_values, gains, 'o-', Label=f'Tuyère Ae/At={ratio}')

plt.xscale('log')
plt.xlabel('Taux de pompage Wp (s^-1)')
plt.ylabel('Gain laser maximum (m^-1)')
plt.title('Influence du pompage et de la tuyère sur le gain laser')
plt.legend()
plt.grid(True)

# Visualisation 3D (optionnelle)
fig = plt.figure(figsize=(10, 7))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Préparation des données
ratios = []
Wps = []
max_gains = []
for res in results:

```

```
ratios.append(res['ratio'])
Wps.append(np.log10(res['Wp']))
max_gains.append(np.max(res['gain']))

ax.scatter(ratios, Wps, max_gains, c=max_gains, cmap='viridis')
ax.set_xlabel('Ratio de tuyère Ae/At')
ax.set_ylabel('log10(Taux de pompage)')
ax.set_zlabel('Gain laser max (m^-1)')
ax.set_title('Gain laser en fonction des paramètres de conception')

plt.show()
```

II-CODE AVEC IDLE DE PYTHON

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

## Paramètres physiques constants
h = 6.626e-34    # Constante de Planck (J.s)
c = 3e8          # Vitesse de la lumière (m/s)
kb = 1.38e-23    # Constante de Boltzmann (J/K)
lambda_laser = 10.6e-6 # Longueur d'onde laser CO2 (m)

## Paramètres du milieu laser CO2-N2
# (valeurs typiques pour un laser GDL)
M_CO2 = 44e-3    # Masse molaire CO2 (kg/mol)
M_N2 = 28e-3     # Masse molaire N2 (kg/mol)
ratio_N2_CO2 = 4 # Ratio N2/CO2 typique

## Fonction pour calculer les propriétés du gaz en fonction de la tuyère
def gas_properties(T0, P0, gamma, M, Ae_At):
    """
    Calcule les propriétés du gaz après détente dans la tuyère
    T0: Température réservoir (K)
    """
```

P0: Pression réservoir (Pa)

gamma: Rapport des chaleurs spécifiques (Cp/Cv)

M: Masse molaire moyenne (kg/mol)

Ae_At: Ratio surface sortie/surface gorge

''''''

R = 8.314 # Constante des gaz parfaits

Calcul de la température et pression après détente

*Me = np.sqrt(2/(gamma-1)) * ((P0*1e-5/101.325)**((gamma-1)/gamma) - 1)*

*Te = T0 / (1 + (gamma-1)/2 * Me**2)*

*Pe = P0 / (1 + (gamma-1)/2 * Me**2)**(gamma/(gamma-1))*

Densité numérique

*n = Pe / (kb * Te)*

return Te, Pe, n, Me

Modèle à 4 niveaux pour le CO2 avec transfert d'énergie N2

def population_model(y, t, params):

''''''

Modèle les populations des niveaux vibrationnels

y = [n0, n1, n2, n3, n_N2] populations des niveaux

params: dictionnaire des paramètres du système

''''''

n0, n1, n2, n3, n_N2 = y

Paramètres extraits

Wp = params['Wp'] # Taux de pompage

k10 = params['k10'] # Relaxation 1→0

k21 = params['k21'] # Relaxation 2→1

k32 = params['k32'] # Relaxation 3→2

k30 = params['k30'] # Relaxation 3→0

k_N2 = params['k_N2'] # Transfert N2→CO2(3)

Annexes

```
R = params['R']      # Désexcitation stimulée

# Équations différentielles
dn0dt = k10*n1 + k30*n3 - Wp*n0
dn1dt = k21*n2 - k10*n1 + R*n2
dn2dt = k32*n3 - k21*n2 - R*n2 + k_N2*n_N2*n0 # Transfert depuis N2
dn3dt = Wp*n0 - k32*n3 - k30*n3
dn_N2dt = -k_N2*n_N2*n0 # Dépompage N
return [dn0dt, dn1dt, dn2dt, dn3dt, dn_N2dt]

## Calcul du gain laser

def calculate_gain(n2, n1, Te, line_width):
    """
    Calcule le gain laser pour la transition 2→1
    n2, n1: populations des niveaux sup/inf
    Te: température d'équilibre (K)
    line_width: largeur de raie (Hz)
    """
    sigma = (lambda_laser**2 * (n2 - n1)) / (8*np.pi * line_width)
    return sigma

## Simulation principale

def simulate_gdl(T0=1500, P0=2e6, gamma=1.4, Ae_At=10, Wp_max=1e6, t_max=1e-5):
    """
    Simulation complète du laser GDL CO2-N2
    T0: Température réservoir (K)
    P0: Pression réservoir (Pa)
    gamma: Rapport Cp/Cv
    Ae_At: Ratio de surface tuyère
    Wp_max: Taux de pompage max (s^-1)
    t_max: Temps de simulation (s)
    """
```

Annexes

''''

Calcul des propriétés du gaz

$M_{mix} = (M_{CO2} + ratio_{N2_CO2} * M_{N2}) / (1 + ratio_{N2_CO2})$ *# Masse molaire moyenne*

$Te, Pe, n_{total}, Me = gas_properties(T0, P0, gamma, M_{mix}, Ae_At)$

Paramètres du modèle de population

params = {

'Wp': Wp_max,

'k10': 1e6, # Relaxation rapide niveau 1

'k21': 5e5,

'k32': 2e5,

'k30': 1e4,

'k_N2': 1e-22, # Taux de transfert N2→CO2

'R': 1e4 # Taux d'émission stimulée

Conditions initiales

$n_{CO2} = n_{total} / (1 + ratio_{N2_CO2})$

$n_{N2} = n_{total} - n_{CO2}$

$y0 = [n_{CO2}, 0, 0, 0, n_{N2}]$ *# Tout dans l'état fondamental*

Résolution temporelle

$t = np.linspace(0, t_{max}, 1000)$

$solution = odeint(population_model, y0, t, args=(params,))$

Calcul du gain

$line_width = 1e9$ *# Largeur de raie typique (Hz)*

$gain = calculate_gain(solution[:,2], solution[:,1], Te, line_width)$

return t, solution, gain, Te, Pe, Me

Exécution et visualisation

if __name__ == "__main__":

Simulation pour différents paramètres

Ae_At_ratios = [5, 10, 20] # Différents ratios de tuyère

Wp_values = np.logspace(4, 6, 5) # Différents taux de pompage

Stockage des résultats

results = []

Simulation pour différentes configurations

for ratio in Ae_At_ratios:

for Wp in Wp_values:

t, pop, gain, Te, Pe, Me = simulate_gdl(Ae_At=ratio, Wp_max=Wp)

results.append({

'ratio': ratio,

'Wp': Wp,

't': t,

'pop': pop,

'gain': gain,

'Te': Te,

'Pe': Pe,

'Me': Me

})

Visualisation 1: Évolution temporelle des populations (pour un cas)

plt.figure(figsize=(12, 6))

case = results[2] # Prend un cas moyen

pop_norm = case['pop'] / np.sum(case['pop'][0,:])

plt.subplot(1, 2, 1)

```
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,0], label='N0 (CO2 fond.)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,1], label='N1 (CO2)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,2], label='N2 (CO2 sup.)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,3], label='N3 (CO2 pompé)')
plt.plot(case['t'], pop_norm[:,4], label='N2 vibrationnel')
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Fraction de population')
plt.title('Évolution des populations moléculaires')
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(case['t'], case['gain'])
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Gain laser (m-1)')
plt.title('Évolution du gain laser')
plt.grid(True)
plt.tight_layout()

# Visualisation 2: Gain max en fonction des paramètres
plt.figure(figsize=(10, 6))
for ratio in Ae_At_ratios:
    gains = []
    for res in results:
        if res['ratio'] == ratio:
            gains.append(np.max(res['gain']))
    plt.plot(Wp_values, gains, 'o-', label=f'Tuyère Ae/At={ratio}')

plt.xscale('log')
plt.xlabel('Taux de pompage Wp (s-1)')
```

```
plt.ylabel('Gain laser maximum (m-1)')
plt.title('Influence du pompage et de la tuyère sur le gain laser')
plt.legend()
plt.grid(True)

# Visualisation 3D (optionnelle)
fig = plt.figure(figsize=(10, 7))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Préparation des données
ratios = []
Wps = []
max_gains = []
for res in results:
    ratios.append(res['ratio'])
    Wps.append(np.log10(res['Wp']))
    max_gains.append(np.max(res['gain']))

ax.scatter(ratios, Wps, max_gains, c=max_gains, cmap='viridis')
ax.set_xlabel('Ratio de tuyère Ae/At')
ax.set_ylabel('log10(Taux de pompage)')
ax.set_zlabel('Gain laser max (m-1)')
ax.set_title('Gain laser en fonction des paramètres de conception')

plt.show
```

Résumé

Cette note présente une étude complète du laser à gaz dynamique (GDL) en mettant l'accent sur le système $\text{CO}_2\text{-N}_2$, où elle passe en revue les principes théoriques du fonctionnement du laser et les mécanismes permettant d'obtenir une inversion de population par refroidissement rapide du gaz lors de son expansion dans des buses spéciales. L'étude s'appuie sur une modélisation mathématique utilisant les équations de taux et les équations de Statz-deMars pour simuler la dynamique des niveaux d'énergie, avec une application pratique via les logiciels MATLAB et Python pour analyser l'influence de facteurs tels que le taux de pompage et la composition du gaz. Ce type de laser se caractérise par un rendement pouvant atteindre 20 % et une puissance élevée (jusqu'à 100 kW), ce qui le rend adapté à diverses applications dans les secteurs industriel (découpe et soudage), médical (chirurgie de précision), militaire (systèmes de guidage) et spatial (propulsion de véhicules). La note propose également des améliorations futures pour accroître l'efficacité grâce à la conception des buses et à l'amélioration de la composition du gaz, soulignant la possibilité de développer des systèmes fermés similaires aux moteurs thermiques pour obtenir de meilleures performances.

تقدم هذه المذكرة دراسة شاملة عن الليزر الغازي الديناميكي (GDL) مع التركيز على نظام $\text{CO}_2\text{-N}_2$ ، حيث تستعرض المبادئ النظرية لتشغيل الليزر والآليات التي تسمح بالحصول على انعكاس في التوزيع السكاني عن طريق التبريد السريع للغاز أثناء تمدده في فوهات خاصة. تعتمد الدراسة على نمذجة رياضية تستخدم معادلات المعدل ومعادلات Statz-deMars لمحاكاة ديناميكيات مستويات الطاقة، مع تطبيق عملي عبر برامج MATLAB و Python لتحليل تأثير عوامل مثل معدل الضخ وتركيب الغاز. يتميز هذا النوع من الليزر بكفاءة تصل إلى 20٪ وقوة عالية (تصل إلى 100 كيلوواط)، مما يجعله مناسباً لمختلف التطبيقات في القطاعات الصناعية (القطع واللحام) والطبية (الجراحة الدقيقة) والعسكرية (أنظمة التوجيه) والفضائية (دفع المركبات). تقترح المذكرة أيضاً تحسينات مستقبلية لزيادة الكفاءة من خلال تصميم الفوهات وتحسين تكوين الغاز، مع التركيز على إمكانية تطوير أنظمة مغلقة مشابهة للمحركات الحرارية للحصول على أداء أفضل.



Département des Sciences de la matière

قسم : علوم المادة

Filière: Physique

شعبة : الفيزياء



تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث

(ملحق القرار 1082 المؤرخ في 2021/12/27)

أنا الممضي أسفله،

السيدة(ة): حوحو مروي.

الصفة: طالب سنة ثانية ماستر

تخصص: فيزياء المواد.

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 200734569. الصادرة ب تاريخ 24.11.2016.

قسم: علوم المادة.

المسجل بكلية: العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة

والمكلف بإنجاز أعمال بحث: مذكرة عنوانها:

Contributions aux Processus physiques des populations pour
améliorer le rendement des lasers G.D.L (GAS Dynamics Laser)

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث المذكور أعلاه وفق ما ينص عليه القرار رقم 1082 المؤرخ في 2021/12/27 المحدد للقواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.

التاريخ: 2021.12.27

إمضاء المعني بالأمر