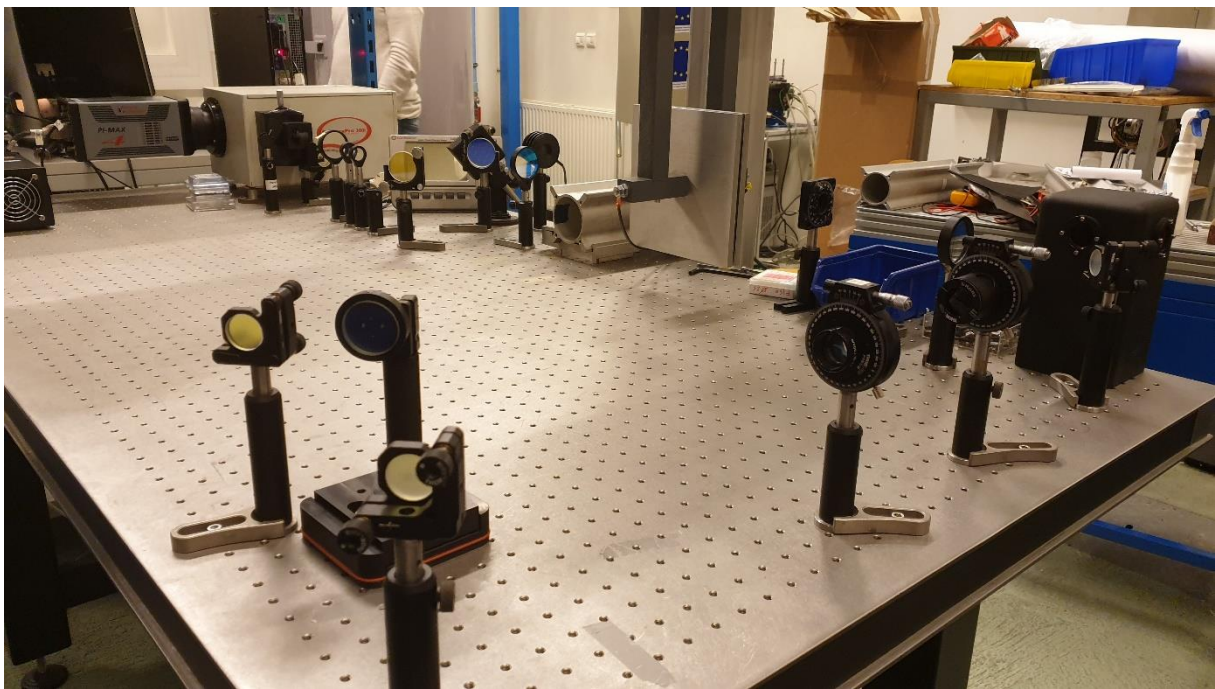


Malo HUSTACHE  
Anastasia LIAPI  
Baptiste MAINFROID  
Jérémy POTTIER  
Hugo VASSARD

Enseignant responsable du projet: Nelson VALDEZ PAULINO

# Rapport : Mesure d'un champ électrique par diagnostic laser





Date de remise du rapport : **17/06/2019**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 - 38**

Intitulé du projet : : Mesure d'un champ électrique par diagnostic laser

Type de projet : ***Expérimental***

Objectifs du projet : - Effectuer un travail de groupe sur une partie de sujet de thèse.  
- Mesurer l'intensité d'un champ électrique grâce à un laser.  
- Comprendre l'enjeu de réduire la consommation de carburant grâce à un laser.  
- Comparer les résultats théoriques aux résultats expérimentaux.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : SHG : Second Harmonic Generation, Laser, Champ électrique

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : ***E 79093***

**INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN**  
**Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur**  
avenue de l'Université - 76801 Saint-Etienne-du-Rouvray - tél : +33 (0)2 32 95 97 00 - fax  
: +33 (0)2 32 95 98 60

## Table des matières

Table des matières .....	4
I. Introduction .....	5
A. Contexte de l'étude .....	5
B. Objectifs .....	6
C. Méthodologie/ organisation du travail .....	6
II. Notions préliminaires.....	7
A. Champ électrique.....	7
B. Méthodes de mesures conventionnelles .....	9
a. Mesure grâce au potentiel .....	9
b. Appareils de mesure .....	10
C. Méthode Second Harmonic Generation (SHG) .....	11
a. Principe de la méthode .....	11
b. Création de l'harmonique .....	12
III. Calculs et simulation préliminaires.....	14
A. Résolution de l'équation de Poisson .....	14
B. Détermination des paramètre expérimentaux par simulation informatique.....	15
IV. Montage expérimentale.....	16
A. Description de l'expérience .....	16
B. Présentation des résultats expérimentaux .....	19
V. Conclusions et perspectives .....	21
VI. Bibliographie .....	22
VII. Annexes .....	23
A. Programmes informatique (python) .....	23
B. Fiche technique du.....	26
C. Intensité SHG pour différentes tension. ....	27

## I. Introduction

### A. Contexte de l'étude

Aujourd'hui, il est nécessaire de réduire notre consommation d'énergie fossile. Cela passe par l'utilisation d'énergies renouvelables, la fabrication de voitures moins polluantes, ... Nous vivons désormais à crédit, c'est-à-dire que nous consommons plus d'énergie fossile que la Terre n'en produit. Il faut donc trouver des solutions pour réduire notre consommation d'énergies non renouvelables.

C'est ainsi que l'entreprise Safran en partenariat avec le Coria cherche à diminuer la consommation de carburant des hélicoptères. Afin d'atteindre cet objectif, des recherches sont réalisées pour diminuer la proportion de carburant dans le mélange air/carburant, on parle alors de régime pauvre. Cependant si l'on diminue la part en carburant utilisé dans le mélange, comment compenser cette perte au niveau énergétique ? Une solution imaginée est l'utilisation du plasma qui va permettre notamment de stabiliser la flamme de la combustion.

Les plasmas permettent de déclencher et d'accélérer les combustions dans les moteurs, ils vont donc améliorer la combustion et aider à contrôler cette dernière. Mais qu'est-ce qu'un plasma ? On parle du « 4<sup>e</sup> état de la matière ». Il s'agit d'un gaz partiellement ionisé (les électrons de certaines molécules ont été expulsés) mais sa charge reste globalement neutre. Pour l'obtenir, il faut apporter de l'énergie, ce qui entraîne l'excitation des degrés d'énergie interne, la dissociation et l'ionisation. Le plasma va alors rendre le mélange, plus précisément le combustible, plus réactif, il va exciter les molécules et créer des intermédiaires qui rendront la réaction plus rapide. Ainsi, le plasma va rendre le combustible plus inflammable, la combustion sera accélérée et elle sera également plus homogène. Pour résumer, il agit comme un catalyseur.

Grâce au plasma et à ce qu'il provoque sur le combustible, nous allons pouvoir utiliser des mélanges plus pauvres en carburant et ainsi diminuer l'émission de polluants comme nous le voulions dans l'introduction.

Mais comment créé-t-on un plasma ? Il existe des plasmas « chauds », qui sont de l'ordre du million de Kelvin, c'est un plasma totalement ionisé et des plasmas « froids » qui sont inférieurs à quelques dizaines de milliers de Kelvin. Pour créer un plasma, il faut créer une décharge qui est générée grâce à des électrodes (plaque, pointe...) à haute tension. En effet, il a été montré que pour obtenir des espèces actives, il faut utiliser des champs électriques élevés. Ensuite, les décharges entrent en contact avec la flamme et les électrons du plasma viennent percuter les molécules d'air ou du combustible, ce qui forme des espèces très réactives.

## B. Objectifs

Le champ électrique créé par le plasma va exciter les molécules ce qui va permettre de créer des intermédiaires qui seront plus rapides, en effet il a été prouvé que la décharge entraîne une accélération de la cinétique de la combustion; il va également permettre de chauffer le mélange. Pour comprendre la cinétique de ces procédés, il est essentiel de mesurer le champ électrique.

De plus, la distribution énergétique est fonction du champ électrique, il faut donc mesurer le champ électrique sur différentes zones de la flamme. Or il nous est impossible de positionner une sonde dans une flamme. Nous allons alors utiliser une technique laser pour mesurer ce champ électrique.

Nous allons ainsi voir, dans un premier temps, ce qu'est un champ électrique, ensuite nous étudierons les différentes méthodes de mesure, leurs avantages, leurs inconvénients ; puis nous discuterons de notre montage expérimental et enfin nous conclurons.

## C. Méthodologie/ organisation du travail

Durant ce projet de P6, notre méthode de travail s'est adaptée à l'ambiance du Coria. Nous sommes sortis du cadre scolaire pour adopter une méthode plus en relation avec la gestion de projet.

Nous avons ainsi appris à travailler en autonomie à la manière d'un département de recherche. Chaque semaine avec M. Valdez-Paulino, notre référent, nous nous retrouvions pour faire le point sur l'avancement du projet. De cette façon, chaque semaine nous pouvions éclaircir les points incompris et les questions soulevées pendant la semaine de recherches, et nous avons alors de nouvelles directives pour la semaine suivante ce qui nous a permis de mener à bien ce projet.

M. Valdez-Paulino nous a aussi fourni de nombreux documents scientifiques (articles, thèses...) qui nous ont beaucoup aidés lors des travaux de recherches théoriques et bibliographiques.

Nous avons commencé par diviser le projet en différentes parties, que nous nous sommes ensuite réparties.

Comme vous pouvez le voir sur le diagramme ci-dessus nous avons chacun travaillé sur une partie, sauf pour une, le code, que nous avons étudié à plusieurs. Dès que quelqu'un avait terminé la rédaction de sa partie, il la déposait sur le drive du projet. Ainsi, chacun pouvait la lire et en discuter lors de nos rassemblements hebdomadaires.

Nous avons attendu assez longtemps l'arrivée du laser et la mise en place finale du montage. Pour ne pas perdre de temps, nous avons donc décidé d'avancer au maximum le rapport et la partie théorique du projet. Une fois les mesures de l'expérience effectuées, nous avons pu faire les comparaisons entre les valeurs théoriques et expérimentales rapidement et finir dans les temps.

Finalement, le travail a pu être rendu à temps malgré un long délai d'attente lié à la préparation de l'expérience. Notre organisation de travail a donc porté ses fruits.

## II. Notions préliminaires

### A. Champ électrique

#### Définition :

Un champ électrique est un champ de force invisible créé par l'attraction et la répulsion de charges électriques (la cause du flux électrique) et se mesure en Volts par mètre (V/m). L'intensité du champ diminue à mesure qu'augmente la distance à sa source

Pour pouvoir éclaircir nos idées sur le champ électrique, commençons par aborder le phénomène d'interaction électrostatique. En 1785, le physicien français Coulomb établit une première loi sur les champs électrostatiques à partir d'un dispositif appelé balance de Coulomb. Il découvre alors la loi d'attraction entre deux charges ponctuelles  $q_1$  et  $q_2$ :

Deux charges fixes, dans un référentiel donné, situées à une distance  $r$  l'une de l'autre, créent une force dirigée selon la droite reliant ces deux points. L'intensité de cette force est proportionnelle à la valeur de  $q_1$  et  $q_2$ . Enfin, des charges de mêmes signes s'attirent et de signes opposés se repoussent.

Loi de Coulomb :

$$\vec{F}_{q_2 \rightarrow q_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_r$$

Par ailleurs, le champ électrique et la force électrostatique sont liés. Si on considère une particule portant une charge  $q$  et soumise à une force électrostatique  $F$  on obtient la relation nous menant au champ électrique :  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

$E$  est en newton par coulomb ( N.C-1)

$F$  est en newton ( N)

$q$  est en coulomb ( C )

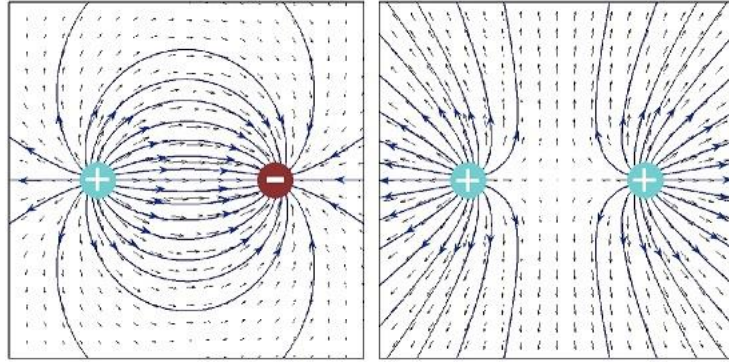
Ainsi, dans un référentiel donné, le champ électrique est la résultante de la superposition de toutes les actions des charges fixes et mobiles situées à proximité d'une charge fixe donnée.

En allant plus loin dans les détails on peut citer la force de Lorentz qui associe en plus le champ magnétique à cette force :

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

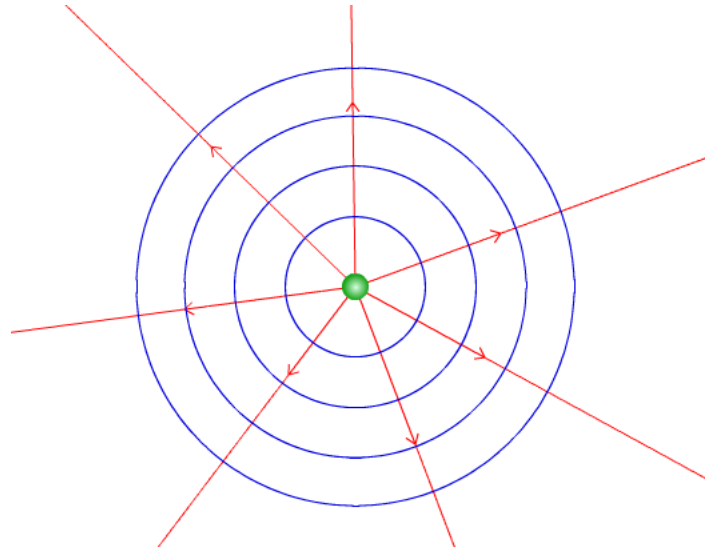
Le champ électrique est radial, c'est à dire que si la charge  $q$  est positive le champ électrique s'éloigne de la charge, alors que s'il est négatif il va se rapprocher de la charge.

Figure 1



Comme montré sur la figure ci-dessus les lignes de champs électriques partent toujours perpendiculairement à la source et aux équipotentielles.

Figure 2



Les équipotentielles sont des lignes dont les points sont situés à égale distance de la charge. Comme le champ électrique est radial, sa valeur en tout point d'une équipotentielle est la même. La figure 2 nous montre ici les lignes de champ en **Rouge** qui sont bien perpendiculaires aux équipotentielles en **Bleu**.

La relation reliant le champ électrique aux équipotentielles vient des quatre

$$\begin{array}{ll} \operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0} & \operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{(Maxwell-Gauss)} & \text{(Maxwell-Faraday)} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \operatorname{div}(\vec{B}) = 0 & \operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \text{(Maxwell-Flux)} & \text{(Maxwell-Ampère)} \end{array}$$

équations de Maxwell :



Et plus particulièrement celle de Maxwell-Faraday qui devient en régime statique :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = \vec{0}$$

Sachant que le champ électrostatique dérive d'un potentiel scalaire, on a :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

On obtient les surfaces équipotentiels par la relation  $dV=0$ .

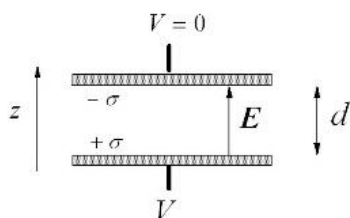
Enfin, le champ électrique est dit conservatif. C'est-à-dire qu'en tout point d'un circuit fermé, la différence de potentielle est nulle.

## B. Méthodes de mesures conventionnelles

Certaines situations nécessitent la mesure du champ électrostatique : connaître les conditions d'une expérience, vérifier que les taux d'exposition d'une usine à ces champs ne sont pas dépassés etc. Il convient donc de pouvoir mesurer ces champs avec plus ou moins de précision.

### a. Mesure grâce au potentiel

Si les conditions expérimentales sont bonnes et qu'il n'y pas d'éléments proches pouvant perturber le champ  $\vec{E}$  que l'on souhaite mesurer (aimants, appareils électroniques, compteur électrique...), la seule étude théorique peut suffire si l'on ne cherche pas de grande précision. C'est ainsi que l'on peut connaître le champ électrique entre deux plaques d'un condensateur plan par exemple :



$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{V}{d} \quad Q = \sigma S = \frac{\epsilon_0 S V}{d} = C V$$

#### Illustration 1 :

Schéma d'un condensateur plan et formules théoriques associées (S est la surface des plaques du condensateur)

Si les conditions expérimentales ne sont pas suffisamment précises et donc qu'ainsi cette première considération théorique ne permet pas d'obtenir une valeur significative pour E, elle souligne toutefois l'importance de la connaissance du potentiel dans le calcul de l'intensité du champ électrique. Il est alors possible de procéder différemment grâce à l'une de grandes formules de l'électrostatique. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le champ électrique est relié au potentiel par l'équation suivante :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

Dans certain cas, l'équation donnant le potentiel  $V(M)$  est connue. Dans ce cas pour connaître  $\vec{E}(M)$  on simplifie par la définition de l'opérateur gradient et l'on résout l'équation aux dérivées partielles.

Dans la pratique, si l'on ne connaît pas l'équation donnant le potentiel  $V(M)$ , on peut effectuer des mesures du potentiel  $V$  en différents points dans le but de la deviner. Ces mesures peuvent être effectuées avec un voltmètre qui mesure une tension c'est-à-dire une différence de potentiels. En fixant un des deux potentiels en référence à 0V, la tension mesurée sera égale au potentiel du point M.

Dans certains cas simples, les différentes mesures montreront que le potentiel est constant, ou qu'il est donné par une équation linéaire dont les paramètres sont facilement identifiables ou calculables. De cette façon, nous obtiendrons l'équation du potentiel en fonction du point M et nous pourrions en déduire  $\vec{E}(M)$  par la méthode précédente.

#### b. Appareils de mesure

Une autre méthode consiste à utiliser un appareil de mesure spécial de champ électrique comme celui présenté sur la photo ci-dessous.



Illustration 2 : Appareil de mesure de champ électrique de la marque Elcowa

Le principe de fonctionnement de l'appareil est simple : on empêche le champ  $\vec{E}$  de pénétrer au sein de l'appareil, et on le laisse entrer uniquement à intervalles réguliers. De cette façon, une tension alternative sera créée par induction et l'on mesure le courant alternatif proportionnel alors créé.

L'avantage de cette méthode est de pouvoir mesurer  $\vec{E}$  sans « retirer » d'énergie à ce champ.

On a la relation entre les intensités de  $\vec{E}$  et de  $U$  (tension en V) :

$E = \frac{U}{d}$  où  $d$  est la distance entre la source du champ et l'appareil.

## C. Méthode Second Harmonic Generation (SHG)

### a. Principe de la méthode

Le but de cette méthode est de mesurer un champ électrique grâce à un laser. La méthode est basée sur la création de l'harmonique d'une onde grâce au procédé « Four Wave Mixing » ou « Mélange à 4 ondes » qui est permis par la présence d'un champ électrique. Cette méthode peut être préférée à d'autres par le fait qu'elle est non destructive grâce, entre autres, à l'utilisation d'un laser. Mais cette méthode se démarque des autres méthodes de mesure laser par le fait que l'onde sortante fait partie du domaine visible et qu'elle est plus facilement mesurable grâce à sa forte intensité (contrairement à l'onde infra-rouge générée par la méthode Four Wave Mixing).

Le laser utilisé est un laser femto ou pico seconde. Celui-ci envoie des pulsations de lumière de l'ordre d'une dizaine de *fs* ou *ps* à une fréquence d'une dizaine de Hertz à la longueur d'onde fondamentale connue (l'énergie des pulsations émises par le laser peut atteindre 50 *mJ*).

Grâce à une lentille convergente, le faisceau du laser est concentré au centre du dispositif où l'on souhaite mesurer le champ électrique : dans notre cas, il s'agit d'un condensateur plan. Au point où tous les rayons convergent le rayon du laser est de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ . À ce moment-là, un harmonique du rayon laser est créé, d'une longueur d'onde égale à la moitié de celle du rayon fondamental. Cette génération d'un harmonique est due à l'interaction en le champ  $\vec{E}$  créé entre les deux plaques et l'onde du laser.

L'onde harmonique est alors facilement séparée de l'onde fondamentale grâce à un système constitué de miroirs dichroïques et d'un prisme. Cette étape est d'autant plus facile que la détection de cette onde est favorisée par l'intensité du rayon sortant. En effet, il est tout d'abord proportionnel à l'intensité du champ  $\vec{E}$  appliqué entre les plaques du condensateur élevée au carré, mais aussi l'intensité de l'harmonique seul créé est quadratiquement proportionnelle à l'intensité du laser entrant.

Après sa création, l'harmonique est ensuite filtré pour supprimer les bruits et les parasites et il est enfin détecté par un photomultiplicateur<sup>1</sup> ou un spectrophotomètre. Analysé selon différentes polarisations, le rayon ainsi obtenu permet de calculer les composantes du champ  $\vec{E}$  selon les différentes directions.<sup>2</sup>

Ce phénomène de création d'un harmonique est évalué quantitativement en différents points par l'équation suivante :

$$P_i^{(2\omega)} = \frac{3}{2}N * \chi_{i,j,k,l}^{(3)}(-2\omega, 0, \omega, \omega) * E_j^{(F)} * E_k^{(\omega)} * E_l^{(\omega)} \quad (1)$$

Où :  $\omega$  : Pulsation du laser en rad/s

$P_i^{(2\omega)}$  : Polarisation induite à  $2\omega$  en C/m<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dispositif permettant de convertir un signal lumineux en signal électrique.

<sup>2</sup> Schéma du dispositif disponible page 17, partie expérimentale

$E_k^{(\omega)}$  et  $E_l^{(\omega)}$  : Champs électriques du laser en V/m ( $E_k^{(\omega)} = E_l^{(\omega)}$  pour la méthode SHG)

$N$  : Nombre de densité du gaz moléculaire

$\chi_{ij,k,l}^{(3)}$  : coefficient de sensibilité (dépend des moments dipolaires des molécules et de l'orientation des champs)

$(-2\omega, 0, \omega, \omega)$  : terme indiquant les polarisations des champs respectifs

Dans notre cas qui se trouve être plus simple (condensateur plan + SHG), l'équation (1) peut-être simplifiée de la façon suivante et devient :

$$I^{(2\omega)} = A * [ENI^{(\omega)}]^2 \quad (2)$$

Où :  $I^{(2\omega)}$  : Intensité du 2<sup>ème</sup> harmonique créé en W.m<sup>2</sup>

$I^{(\omega)}$  : Intensité de la pulsation du laser en W.m<sup>2</sup>

$E$  : Champ électrique en V/m

$A$  : Constante dépendant de la polarisation de  $E$  et du mélange moléculaire au lieu de la mesure

Ainsi en connaissant l'intensité des pulsations du laser, il reste à effectuer des mesures de l'intensité reçue par le capteur (2<sup>ème</sup> harmonique) et à évaluer la constante  $A$  à l'aide des conditions expérimentales afin de pouvoir calculer  $E$  en l'isolant dans l'équation (2).

## b. Création de l'harmonique

Le cœur de la méthode repose sur la création de l'harmonique au niveau du centre du condensateur plan. La SHG est un processus d'optique non linéaire couramment utilisé lorsque l'on souhaite doubler la fréquence d'une onde. Dans notre contexte d'étude, la création de l'harmonique est plus complexe que dans le cadre usuel d'utilisation de la méthode.

En effet, souvent l'on utilise un laser que l'on concentre sur un matériau dit non linéaire<sup>3</sup>, et non pas dans l'air dans un champ électrique particulier, comme c'est le cas pour nous. C'est pourquoi nous allons tout d'abord expliquer la création de l'harmonique dans le cas classique avant d'établir une analogie avec le cadre de notre étude.

Considérons un atome du matériau sur lequel est concentré le laser. Cet atome va absorber un premier photon du laser d'énergie  $E_1$ . De ce fait l'atome va s'exciter et

---

<sup>3</sup> En rapport à la structure du matériau. Il n'existe qu'un seul type de matériau non linéaire pouvant servir à la génération d'un second harmonique : il s'agit des cristaux sans symétries d'inversion. Par conséquent les cristaux les plus simples étant souvent cubiques ne peuvent pas générer un harmonique. Le triborate de bismuth ( $BiB_3O_6$ ) est un exemple de cristal non linéaire pouvant être utilisé pour une SHG.

monter d'un niveau d'énergie. Alors, le même atome va absorber un second photon identique au premier, le faisant ainsi passer sur un niveau d'énergie encore supérieur. A ce moment-là, l'atome va se désexciter, et ce, non pas en redescendant sur les couches inférieures l'une après l'autre, mais en faisant revenir dans son état fondamental en un seul et même temps.

De ce fait, un seul photon est émis d'énergie  $E_2 = 2E_1$  de fréquence doublée et de longueur d'onde divisée par deux. En effet, on a :

$$E_1 = h\nu_1 = \frac{hc}{\lambda_1} \quad \text{Donc } E_2 = 2h\nu_1 = h\nu_2 = \frac{hc}{\lambda_2} \quad \text{avec } \nu_2 = 2\nu_1 \text{ et } \lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2}$$

$h$  : constante de Planck en J.s     $\nu$  : fréquence de l'onde en Hz     $\lambda$  : longueur d'onde en m



Illustration 3 :

Excitations et désexcitation  
de l'atome

Ce résultat se retrouve aussi de la façon suivante :

L'onde incidente possède une énergie  $E = E_0 \sin(\omega t)$ . Celle-ci, par l'effet de la rencontre entre ses photons et le matériau, va induire une polarisation  $P$  définie par :

$$P = K_2 E_0^2 \sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} K_2 E_0^2 (1 - \cos(2\omega t))$$

$\omega$  : pulsation de l'onde ( $= 2\pi\nu$ )     $K_2$  : constante

$E_0$  : Amplitude de l'onde

Ainsi l'on voit que l'onde créée possède une pulsation

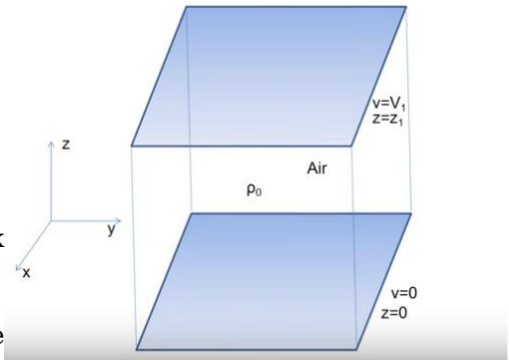
### III. Calculs et simulation préliminaires

#### A. Résolution de l'équation de Poisson

Introduction : L'équation de Poisson et de Laplace.

Système étudié : condensateur constitué de deux plaques conductrices infinies dans la direction z

Dans la figure ci-dessus :  $\rho_v$  : densité volumique de charge (cste)



Le potentiel varie seulement par rapport à la coordonnée z, de  $v=0$  (pour  $z=0$ ) à  $v=V_1$  (pour  $z=z_1$ )  
 $\rho_v = \rho_0$  pour la région entre les deux plaques conductrices

$\epsilon_0$ : permittivité diélectrique du vide

Première étape: Intégration (quand le potentiel  $v$  est une fonction d'une variable).

L'équation de Poisson s'écrit:  $\nabla^2 * v = -\frac{\rho_v}{\epsilon_0}$  (a)

Si  $\rho_v = 0$  nous obtenons, l'équation de Laplace:  $\nabla^2 * v = 0$

Le potentiel  $v$  varie seulement par rapport à z:  $\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -\frac{\rho_0}{\epsilon_0}$  (b)

Nous intégrons (b) par rapport à z:  $\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\rho_0}{\epsilon_0} z + C_1$  (c), où  $C_1$  la constante d'intégration.

Nous intégrons une deuxième fois la relation (c) par rapport à z et nous obtenons:  $v = -\frac{\rho_0}{2 * \epsilon_0} * z^2 + C_1 * z + C_2$  (d), où  $C_2$  la deuxième constante d'intégration.

Deuxième étape : Nous allons appliquer des conditions aux limites afin de trouver les deux constantes d'intégration.  $0 = -\frac{\rho_0}{2 * \epsilon_0} * 0^2 + C_1 * 0 + C_2$  (e)

Donc, nous trouvons que  $C_2 = 0$

De même, nous allons trouver  $C_1$  pour  $z=z_1$  et  $v=V_1$ .

Alors, nous obtenons le résultat suivant :  $V_1 = -\frac{\rho_0}{2 * \epsilon_0} * z_1^2 + C_1 * z_1$  (f)

Finalement,  $C_1 = \left( \frac{V_1}{z_1} + \frac{\rho_0}{2 * \epsilon_0} * z_1 \right)$

Nous allons remplacer les expressions des  $C_1$  et  $C_2$  dans la relation (d), ce qui nous donne:

$v = -\frac{\rho_0}{2 * \epsilon_0} * z^2 + \frac{V_1}{z_1} * z + \frac{\rho_0}{2 * \epsilon_0} * z_1 * z$  (g)

Troisième étape : Le champ électrique est le gradient du potentiel électrique avec un signe négatif. Pour calculer le champ électrique, nous allons appliquer la formule suivante :

$$\vec{E} = -\nabla * v = -\frac{\rho_0}{\epsilon_0} * z + \frac{V_1}{z_1} + \frac{\rho_0}{2 * \epsilon_0} * z_1$$
 (h)

Nous pouvons utiliser l'équation de Poisson pour résoudre des problèmes de densité de charge volumique tels que les tubes à vide et la conversion d'énergie.

## B. Détermination des paramètres expérimentaux par simulation informatique

Le code que nous avons (édité sous Python) est essentiel pour la continuité du projet. En effet, il va nous permettre d'obtenir des résultats théoriques que nous confronterons aux résultats expérimentaux.

Au début du code, il faut modifier les caractéristiques techniques du montage pour qu'ils soient identiques à notre montage expérimental (écart entre plaques du condensateur, longueur de celles-ci, épaisseur, puissance exercée entre elles etc.). Les résultats dépendent bien évidemment de ces valeurs. Nous avons pris soin de les mesurer le plus précisément possible avant de procéder à l'expérience.

A partir de ces caractéristiques, le code résout l'équation de Poisson et construit des graphiques relatifs aux équipotentiels. On obtient les résultats suivants :

### **Solving/Analyzing :**

*potential min :* -

0.03836868398311318

*potential max :*

0.03836868398311251

*Ex min :* -0.6040042593187329

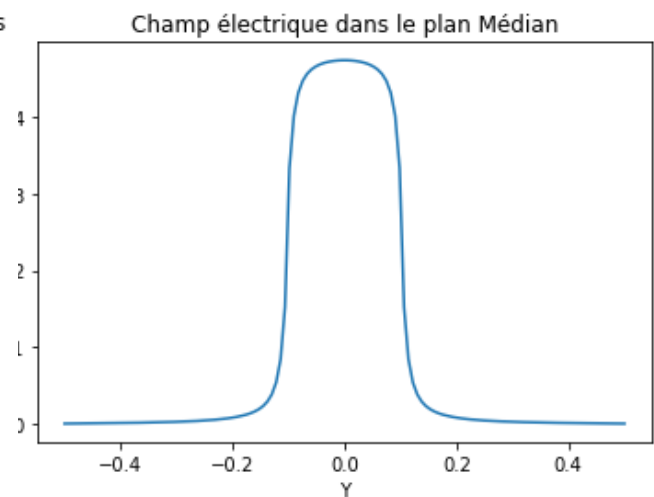
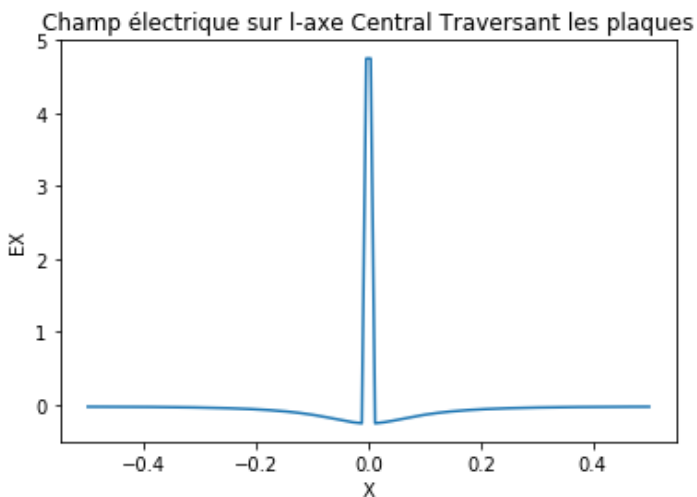
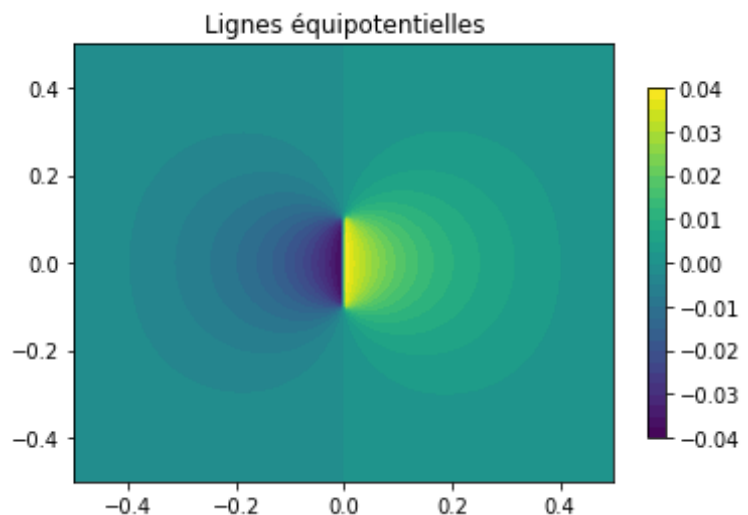
*Ex max :*

4.7463881506730194

*Ey min :* -1.590412749894009

*Ey max :*

1.5904127498940097



Sur la première figure on voit bien les lignes équipotentielles qui partent des plaques, se dessiner. A gauche en bleu on voit qu'il y a la charge négative et à droite en jaune la charge positive. Ces lignes sont conformes à la théorie du champ électrique expliqué en début de rapport.

Les deux autres graphiques montrent la valeur du champ électrique en fonction de coordonnées dans l'espace, respectivement X l'axe central traversant les plaques et Y correspondant à l'axe du plan médian.

On voit le champ augmenter puis chuter brutalement autour de l'origine. Il s'agit du phénomène de potentiel nul à l'extérieur des plaques du condensateur.

Enfin le code nous donne les valeurs du champ maximum : 4.7463881506730194. Ainsi que sa position : 0, l'origine.

#### IV. Montage expérimentale

##### A. Description de l'expérience

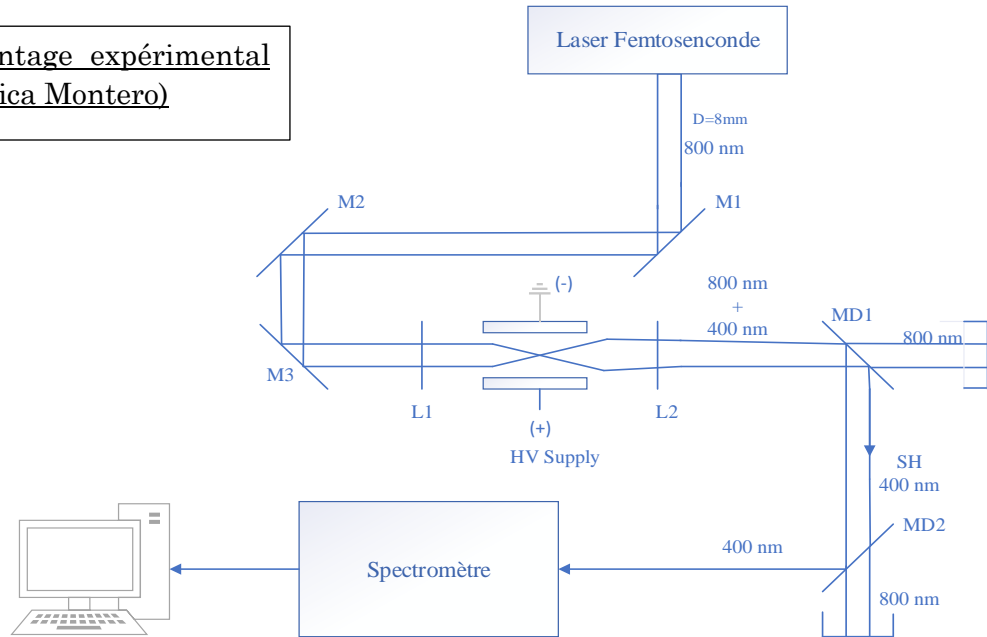


Illustration 5 :  
Vue d'ensemble du montage

La méthode par génération de seconde harmonique doit permettre de mettre en évidence et mesurer un champ électrique externe qui donne l'intensité de la deuxième



Illustration 6 : Montage expérimental  
(Rapport Stage Yessica Montero)



harmonique créée par le champ de la forme :  $I(2\omega)$ , il est proportionnel au champ électrique,  $E$ , à la densité numérique, à  $N$  le nombre de densité moléculaire du gaz (dans lequel a lieu l'expérience ici air) et à l'intensité de la pulsation du laser notée  $I$ . On obtient alors  $I(2\omega) = A \times (ENI)^2$

On connaît donc ici avant l'expérience  $E$ ,  $N$  et  $I$  ; l'expérience nous permet donc de trouver  $I(2\omega)$ . Dès lors, on peut facilement trouver  $A$  une constante qui dépend de la polarisation du laser.

Grâce à la simulation informatique réalisée en amont, on a pu déterminer les conditions initiales du champ électrique et ainsi savoir en quel point le rayon du laser doit passer là où l'intensité du champ électrique est la plus élevée entre les deux plaques (via l'étude des équipotentielles).



Illustration 7 : première partie du montage expérimental

On utilise un laser dont la longueur d'onde initiale est de 800 nm. On le fait passer par deux plaques de 200mm<sup>2</sup> qui forment le condensateur plan plutôt que deux électrodes qui génèrent du plasma comme dans d'autres études, car ici la géométrie rectangulaire du condensateur est plus facile à étudier et facilite les calculs, contrairement à la géométrie du plasma très complexe. On applique une tension entre les plaques de 2000V, pour mesurer la distribution spatiale du signal. On mesure ainsi la valeur quadratique moyenne du champ électrique, soit :  $[E(t)^2]_z^{1/2}$

Le laser passe, après une succession de 3 miroirs, par deux polariseurs qui nous permettent de faire varier l'intensité du laser. On choisit la polarisation du signal pour le rayon soit polarisé parallèlement à la direction du champ électrique car le laser est polarisé linéairement pour le moment. Puis grâce à une lentille on fait le point focal au milieu de l'écartement de 5mm entre les deux plaques.

Après le passage dans une lentille, le laser passe par deux miroirs dichroïques qui permettent de séparer l'onde fondamentale de la deuxième harmonique qui vient d'être créée par le champs électrique du condensateur plan. On purifie un maximum le signal pour n'avoir alors que la seconde harmonique grâce à deux filtres 800nm (car un filtre n'est jamais à 100% efficace).

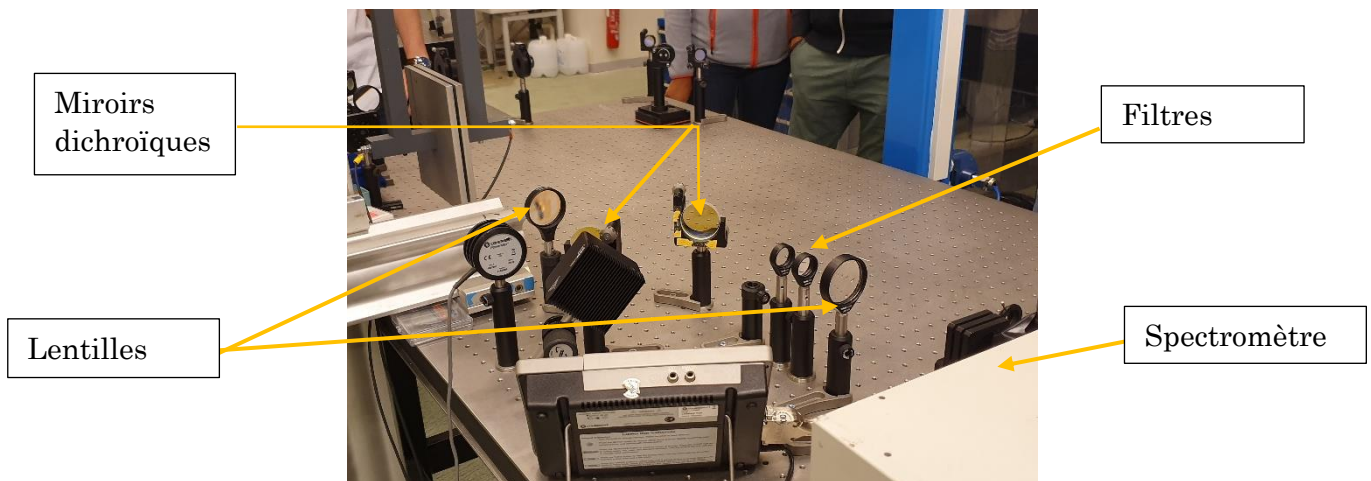


Illustration 8 : deuxième partie du montage expérimental

Pour finir, une troisième lentille avec un distance focale de 200mm, permet de faire converger le laser sur le spectrophotomètre qui transmet les résultats à l'ordinateur.

## B. Présentation des résultats expérimentaux

L'expérience utilise un laser très puissant et dangereux, nous n'avons donc pas participé à l'expérience, ni à la mise en place du montage car le matériel est trop précieux pour que le laborantin nous laisse manipuler. L'expérience fut cependant réalisée par notre tuteur et sa stagiaire en coria, une première dans ce centre de recherche qui n'avait jamais fait ce type de manipulation.

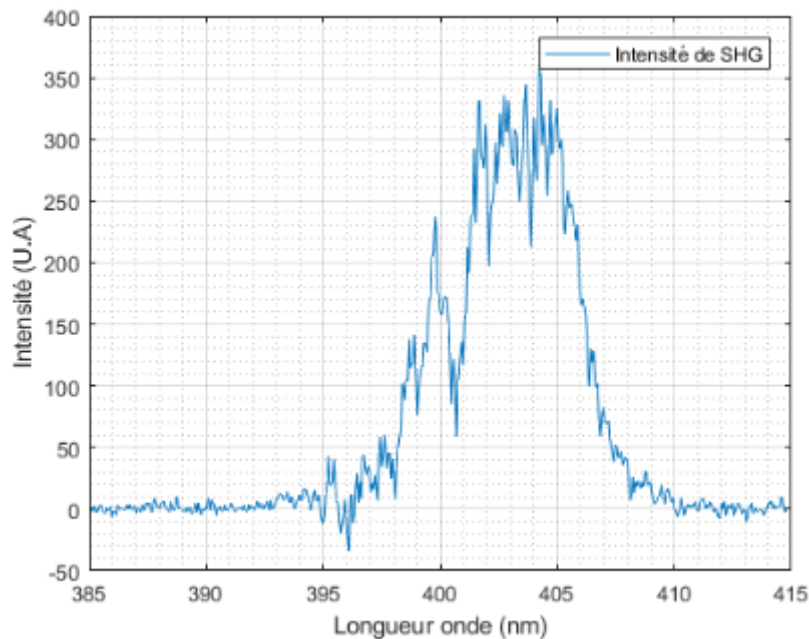


Illustration 9 : Courbe de l'intensité en fonction de la longueur d'onde capté par le spectromètre

On obtient un pic significatif aux alentours de 400nm. Ce pic démontre que l'on obtient bien la seconde harmonique créée par le champ électrique lequel met en évidence la présence du champ électrique. On a donc bien montré que l'on peut mesurer le champ électrique grâce à un laser. Avec l'intensité que l'on obtient on peut résoudre les calculs suivants :

$$I(2\omega) = A \times (ENI)^2$$

$$A = \frac{[I(2\omega)]}{(ENI)^2}$$

Pour le calcul de A, E=2000V/cm; I = 680 mW (milliwatts), I(2w)= 1200 u.a, N=2.461x10<sup>25</sup>

$$A = \frac{1200}{(2000 \times 2.461 \times 10^{25} \times 0,680)^2} = 1.071 \times 10^{-54}$$

Lors du premier essai, l'expérience semblait réussie. Cependant, nous avons constaté un problème qui remettait en cause les résultats de l'expérience : le spectromètre captait une courbe à 400nm lorsque le condensateur était éteint. Cela signifierait que ce n'est pas le champ électrique qui permettrait de créer la seconde harmonique, ce qui serait aberrant. Le problème fut résolu grâce à la mise en place de deux autres miroirs dichroïques avant les polariseurs car le laser émet deux signaux d'onde, l'un à 800nm (voulu) et un à 400nm, non désiré, qui est supprimé grâce aux miroirs ajoutés.

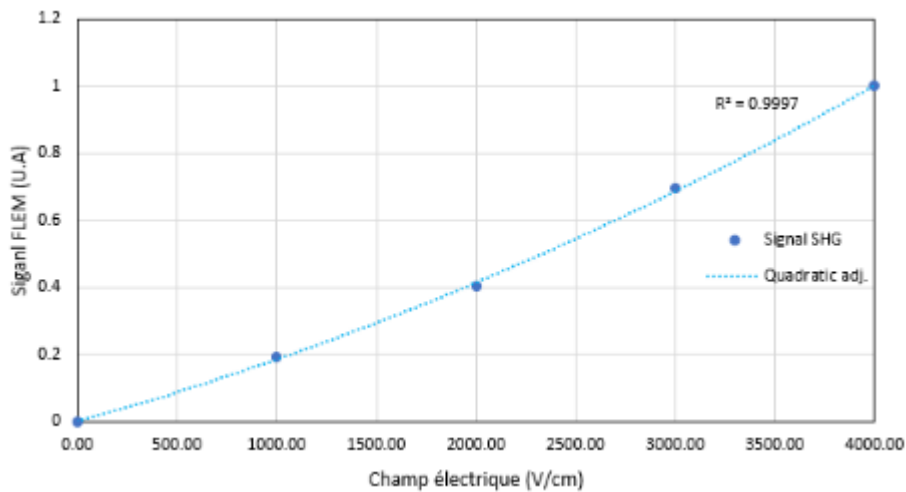


Illustration 10 : Courbe d'étalonnage normalisée de l'intensité du signal en fonction du champ électrique, où FLEM est l'intensité de la signal du SHG

On fait également varier le champ électrique créé par le condensateur pour voir son impact sur l'intensité du signal perçu par le spectromètre. On voit ici que les deux valeurs sont directement liées. On en déduit donc que la méthode de mesure par laser du champ électrique permet non seulement de mettre en évidence la présence du champ mais aussi de mesurer son intensité.

## V. Conclusions et perspectives

Comme il est expliqué dans la partie décrivant l'expérience ici on fait une mesure du champ électrique par laser cependant entre deux plaques d'un condensateur plan car la géométrie rectangulaire est plus facile à étudier que celle complexe du plasma.

On a donc pu déterminer la constante  $A$  qui dépend de la polarisation.

A terme cette expérience doit être mise en place pour étudier le champ électrique du plasma le tout sur une flamme. Or, désormais l'on connaît  $A$ , la seule inconnue qui demeurera sera  $I$  l'intensité du champ électrique.

L'expérience nous permet donc de ne plus avoir à tenir compte de la géométrie complexe du plasma et permet ainsi d'étudier le champ électrique de celui-ci par la même méthode en remplaçant le condensateur plan.

C'est toute la thèse de notre enseignant responsable du projet : Nelson VALDEZ PAULINO qui va pouvoir dans la suite utiliser cette méthode de mesure pour voir l'impact du champ électrique sur la combustion. L'objectif étant de montrer que l'on peut diminuer le rapport air/comburant en utilisant un champ électrique en contrepartie lors de la combustion.

Cette expérience de groupe nous aura donc permis de voir ce qu'est concrètement le travail de chercheur dans le domaine de la propulsion et de mieux connaître les possibilités qu'offre le choix d'être doctorant.

## VI. Bibliographie

- [1]. DOGARIU, Arthur, M. GOLDBERG, Benjamin, O'BYRNE, Sean, [et al.], Species-Independent Femtosecond Localized Electric Field Measurement, Princeton University, 2017.
- [2]. ECKERT ZAKARI, FREDERICKSON KRAIG, , MARIEN SIMENI SIMENI, [et al.], « Electric field in Ns pulse and AC electric discharges in a hydrogen diffusion flame », in Combustion and Flame, 2018.
- [3]. « Génération de seconde harmonique — Wikipédia » [En ligne : [https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9ration\\_de\\_seconde\\_harmonique](https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9ration_de_seconde_harmonique)].
- [4]. « Glossaire : Champ électrique » [En ligne : <https://www.greenfacts.org/fr/glossaire/abc/champ-electrique.htm>]. « Le Champ Électrique » [En ligne : <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/seconde/mecanique/champ-electrique.html>].
- [5]. « Le plasma en renfort de la combustion » [En ligne : <https://www.onera.fr/fr/actualites/le-plasma-en-renfort-de-la-combustion>].
- [6]. MAGNUS BUHRAGRD, et MATS JÖNSSON, Measuring dc electric fields using second harmonic generation in a centro-symmetric gas, 1985, [En ligne : <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/2260068>].
- [7]. « Mesure de champ électrique » [En ligne : <https://www.faulhaber.com/fr/marches/surveillance-mesure-de-precision/mesure-de-champ-electrique/>].
- [8]. « Mesure des champs électromagnétiques | SNA CEM » [En ligne : [https://ondes-info.ineris.fr/content/mesure\\_champs\\_electromagnetiques](https://ondes-info.ineris.fr/content/mesure_champs_electromagnetiques)].
- [9]. R. NAVE, « LaPlace's and Poisson's Equations », [En ligne : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/laplace.html>].
- [10]. PILLA, Guillaume, Etude expérimentale de la stabilisation de flammes propane-air de prémélange par décharges nanosecondes impulsionsnelles répétitives, Ecole Centrale Paris, 2018.
- [11]. SLABLAB ABDALLAH, Étude de la génération de rayonnement optique de second harmonique dans les systèmes nanométriques et fabrication des sondes optiques pour le champ proche, ]. Ecole normale supérieur de Cachan, 2010.
- [12]. STARIKOVSKIY, Audrey et ALEKSANDROV, Nickolay, Progress in Energy and Combustion Science, 2013.
- [13]. W.H. PRESS, S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING, [et al.], « Numerical recipes, the art of scientific computing », [En ligne : <http://www.f-legrand.fr/scidoc/docmml/numerique/elliptique/poisson/poisson.html>].

## VII. Annexes

### A. Programmes informatique (python)

```
1# -*- coding: utf-8 -*-
2import numpy as np
3from scipy.sparse import dia_matrix, diags
4import matplotlib.pyplot as plt
5import scipy.sparse.linalg as spl
6
7
8Lx = 1.
9Ly = 1.
10
11# physical parameters
12
13ecart = 0.005 # distance entre les plaques (mètres)
14longueur = 0.2 # longueur des plaques (mètres)
15epaisseur = 0.005 # epaisseur des plaques (mètres)
16power =2000. # puissance electrique appliquée aux plaques (Watts)
17
18# positions des plaques
19bottom = - longueur / 2
20top = + longueur / 2
21
22plaque1 = - ecart / 2
23plaque2 = + ecart / 2
24
25# numerical parameters
26ni = 128
27nj = 128
28
29# mesh
30X = np.linspace(-Lx / 2, Lx / 2, ni)
31Y = np.linspace(-Ly / 2, Ly / 2, nj)
32dX = np.gradient(X)
33dY = np.gradient(Y)
```

```

35 def to_index(i, j):
36     return i + j * ni
37
38
39 def to_ijk(index):
40     j = index // ni
41     index %= ni
42
43     i = index
44     return i, j
45
46 print("Building the matrix")
47 nijk = ni * nj
48
49 # empty matrix
50 poisson = dia_matrix((nijk, nijk))
51 poisson.setdiag(0., k=ni)
52 poisson.setdiag(0., k=1)
53 poisson.setdiag(1.)
54 poisson.setdiag(0., k=-1)
55 poisson.setdiag(0., k=-ni)
56
57 # empty rhs
58 rhs = np.zeros((nijk))
59
60 for index in range(nijk):
61     i, j = to_ijk(index)
62
63     dx = dX[i]
64     dy = dY[j]
65
66
67 # define matrix
68 poisson.data[:, index] = [dx ** 2,
69                          dy ** 2,
70                          -2. * (dx ** 2 + dy ** 2),
71                          dy ** 2,
72                          dx ** 2]
73
74 # define rhs,
75 if bottom < Y[j] < top:
76     xl = X[i] - dx / 2
77     xr = X[i] + dx / 2
78
79     pll = plaque1 - epaisseur / 2
80     plr = plaque1 + epaisseur / 2
81
82     l1 = min(max(xl, pll), xr)
83     r1 = max(min(xr, plr), xl)
84
85     rhs[index] = power * dy * dy * dx * (r1 - l1)
86
87     p2l = plaque2 - epaisseur / 2
88     p2r = plaque2 + epaisseur / 2
89     l2 = min(max(xl, p2l), xr)
90     r2 = max(min(xr, p2r), xl)
91
92     rhs[index] += - power * dy * dy * dx * (r2 - l2)
93
94 # define boundary condition (Dirichlet)
95 if i == 0:
96     poisson.data[:, index] = [0., 0., 1., 0., 0.]
97     rhs[index] = 0.

```



```

102     if j == 0:
103         poisson.data[:, index] = [0., 0., 1., 0., 0.]
104         rhs[index] = 0.
105
106     if j == nj - 1:
107         poisson.data[:, index] = [0., 0., 1., 0., 0.]
108         rhs[index] = 0.
109
110 # change storage of the matrix in memory
111 poisson = poisson.tocsc()
112
113 # preconditionning (faster resolution)
114 def jacobi(A, rhs):
115     d = A.diagonal()
116     invd = diags(1. / d)
117     A = invd @ A
118     rhs = invd @ rhs
119     return A, rhs
120
121 poisson, rhs = jacobi(poisson, rhs)
122
123 print("Solving")
124 x, info = spl.minres(poisson, rhs, tol=1e-6, show=False)
125 potential = x.reshape((nj, ni))
126 Ey, Ex = np.gradient(potential, dx, dy)
127
128 print("Analyzing")
129 print(potential.min(), potential.max())
130 print(Ex.min(), Ex.max())
131 print(Ey.min(), Ey.max())
132
123 print("Solving")
124 x, info = spl.minres(poisson, rhs, tol=1e-6, show=False)
125 potential = x.reshape((nj, ni))
126 Ey, Ex = np.gradient(potential, dx, dy)
127
128 print("Analyzing")
129 print(potential.min(), potential.max())
130 print(Ex.min(), Ex.max())
131 print(Ey.min(), Ey.max())
132
133 plt.figure()
134 CS = plt.contourf(X, Y, potential[:, :], 30)
135 CB = plt.colorbar( CS , shrink =0.8 , extend = 'both')
136 plt.title('Lignes équipotentiellles')
137
138
139 plt.figure()
140 plt.plot(X, Ex[nj // 2, :])
141 plt.title('Champ électrique sur l-axe Central Traversant les plaques')
142 plt.ylabel('EX')
143 plt.xlabel('X')
144
145 plt.figure()
146 plt.plot(Y, Ex[:, ni // 2])
147 plt.title('Champ électrique dans le plan Médian')
148 plt.ylabel('EX')
149 plt.xlabel('Y')
150
151 #plt.show()

```

## B. Fiche technique du générateur

1 Offered at \$ 600.00

### PACIFIC PRECISION INSTRUMENTS HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY, - 2 KV High Voltage Power Supply

In addition to this Pacific Precision 20410L, Capovani Brothers Inc stocks a wide range of used high voltage power supplies. Typical manufacturers include Bertan, Glassman, Hitek Power Systems, Pacific Precision, and Spellman.

To view our complete stock of used high voltage power supplies, visit our [High Voltage Power Supplies Category](#).

Learn about our [Power Supplies Refurbishment and Functional Testing Procedures](#)

This used high voltage power supply and all the other used and refurbished semiconductor, scientific, and laboratory equipment listed on this website are owned by Capovani Brothers Inc. and stored at our facility in Scotia, NY.

Sell us your used, surplus or idle assets! [Send us your surplus equipment list](#)

**Location:** Scotia, New York, United States

<b>Unit Price</b>	\$ 600.00
<b>Number of Units</b>	1
<b>Manufacturer</b>	Pacific Prec.
<b>Model</b>	20410L
<b>Maximum Output Voltage</b>	-2.0 kV
<b>Maximum Output Current</b>	10.0 mA
<b>Panel Meters</b>	Analog
<b>Other Information</b>	Negative output
<b>Power Requirements</b>	115/ 230 V
<b>Condition</b>	Very Good
<b>Exterior Dimensions</b>	
Width	19.000 in (48.3 cm)
Depth	13.000 in (33.0 cm)
Height	4.000 in (10.2 cm)



[... other images](#)

C. Intensité SHG pour différentes tension

