



جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf

Faculté de Physique
Département de Physique Energétique

POLYCOPIE DES TRAVAUX PRATIQUES

Destiné aux étudiants en Master 1, Option : Procédés Plasmas et Lasers

Titre :

CALCUL DES COEFFICIENTS DE TRANSPORT ÉLECTRONIQUE D'UN PLASMA FROID

Elaboré par :

M. Driss AMIR AID	Maître de Conférences B, USTO-MB
M. Zahir HARRACHE	Maître de Conférences A, USTO-MB
Mlle. Fatiha GHALEB	Chercheuse, USTO-MB

Polycopié des Travaux Pratiques

CALCUL DES COEFFICIENTS DE TRANSPORT ELECTRONIQUE D'UN PLASMA FROID

– **Driss AMIR AID, Zahir HARRACHE & Fatiha GHALEB** –

Faculté de Physique

Master 1: Procédés Plasmas et Lasers

Année 2014 – 2015

TABLE DES MATIÈRES

I Préface	3
II Rappels théoriques	4
1/ Introduction	4
2/ Décharge électrique	4
3/ Equation de Boltzmann	5
4/ Coefficients de transport électronique d'un gaz	5
5/ L'environnement de logiciel Bolsig+	5
6/ Constantes universelles	6
7/ Conversion des unités	6
III TP n° 1 : Fonction de distribution	7
1/ Partie théorique	7
2/ Manipulation	7
IV TP n° 2 : Vitesse de dérive	8
1/ Partie théorique	8
2/ Manipulation	8
V TP n° 3 : Energie moyenne	9
1/ Partie théorique	9
2/ Manipulation	9
VI TP n° 4 : Coefficient d'ionisation	10
1/ Partie théorique	10
2/ Manipulation	10

VII TP n° 5 : Calcul des coefficients de transport électronique pour un mélange gazeux ($N_2 - O_2$)	11
1/ Partie théorique	11
2/ Manipulation	11
VIII TP n° 6 : Calcul des coefficients de transport électronique pour un mélange gazeux ($Ne - Xe$)	12
1/ Partie théorique	12
2/ Manipulation	12

I PRÉFACE

Ce polycopié est constitué de textes de travaux pratiques assistés par ordinateur élaborés pour calculer les coefficients de transport électronique d'un gaz faiblement ionisé (plasma froid) via un code numérique de résolution de l'équation de Boltzmann (BOLSIG+) dans le cas stationnaire et pour un champ uniforme. A partir d'un jeu de sections efficaces des processus de collisions considérés, le code BOLSIG+ permet de calculer la fonction de distribution en énergie des électrons (FDEE) et par voie de conséquence la détermination des coefficients de transport électronique comme la vitesse de dérive, l'énergie moyenne et le coefficient de d'ionisation. Ces grandeurs sont souvent utilisées comme paramètres d'entrée pour la description fluide de la décharge.

Cet enseignement, qui se déroule au cours d'un semestre au niveau de la Faculté de Physique (*précédemment Département de Physique de la Faculté des Sciences*), est destiné aux étudiants en Master 1, option : procédés plasmas et lasers. Il permet d'approfondir certaines notions de base déjà présentées en séances de cours Physique des Plasmas.

Les textes de travaux pratiques que nous proposons, comportement chacun, une partie théorique suivie d'expérimentations explicatives et assistées par ordinateur. Ces textes ont été élaborés pour la formation des étudiants LMD 1ère année master plasmas et lasers.

Tout commentaire, proposition ou critique constructive permettant l'amélioration des textes ainsi élaborés sera recueillie avec grand intérêt.

Driss Amir Aid
Zahir Harrache
Fatiha Ghaleb

Oran, le vendredi 14 novembre 2014

II RAPPELS THÉORIQUES

1/ Introduction

Le terme plasma a été introduit en 1928 par **Langmuir** et **Tonks** pour désigner, dans les tubes à décharges, certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre. Par la suite, les propriétés uniques des plasmas ont amené les scientifiques à nommer le plasma le quatrième état de la matière, faisant suite, dans l'échelle des températures, aux trois états classiques : solide, liquide et gaz.

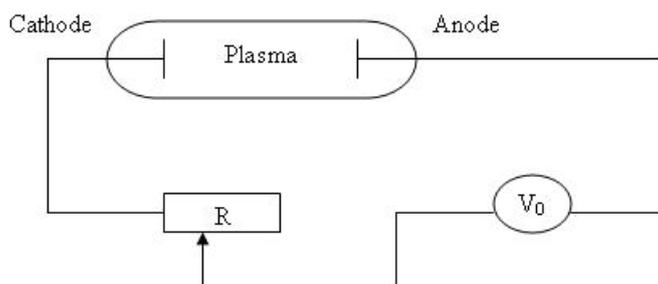
Un plasma est une collection d'électrons, de radicaux libres, d'ions des deux charges, de photons de diverses énergies allant de l'UV à l'infrarouge lointain, d'atomes libres et de molécules dans des états neutres et excités. Chaque particule chargée dans un plasma interagit simultanément avec les autres grâce au long rayon d'action de la force électrique entre particules chargées (*force coulombienne*). Ces interactions créent un comportement collectif qui n'existe pas dans les gaz neutres et procurent au plasma des propriétés uniques.

On peut diviser les plasmas en deux catégories. La première concerne les **PLASMAS CHAUDS** ou dit en équilibre thermodynamique locale. Ils sont caractérisés par une densité d'énergie élevée et une température égale pour toutes les espèces (*ions, électrons, neutres*). Les plasmas naturels comme les étoiles, les aurores boréales, les éclairs, les flammes, etc. sont en équilibre thermodynamique ce qui n'est pas le cas pour la plupart des plasmas créés en laboratoire.

La deuxième catégorie appartient aux plasmas hors d'équilibre thermodynamique, appelée communément **PLASMAS FROIDS**, qui n'ont pas une seule température proprement dite. Par abus de langage, on définit cependant trois températures importantes $T_e \gg T_i > T_n$, où T_e est la température électronique, T_i la température ionique et T_n la température des neutres, proche de la température ambiante. Ils sont caractérisés par une densité d'énergie plus faible que les plasmas chauds et une différence marquée entre la température électronique et la température des particules lourdes.

Les plasmas sont caractérisés principalement par les paramètres suivants : le libre parcours moyen, la longueur de Debye, la température du plasma, la densité et la distribution d'énergie des électrons. La majorité de ces plasmas sont créés en laboratoire par décharge électrique.

2/ Décharge électrique



Le terme de décharge électrique s'applique à tout mécanisme de passage de courant dans un gaz. On distingue plusieurs types de décharges électriques autonomes générées par une tension continue à faible pression et courant faible ; cette méthode reste la plus classique pour réaliser une décharge. On observe dans les tubes à gaz une colonne neutre uniforme lumineuse diffuse constituée d'un plasma froid occupant le volume total du tube sauf au voisinage des électrodes, on parle alors de décharge lumineuse ; et pour une pression plus importante proche de la pression atmosphérique et une intensité importante de l'ordre de l'ampère, on obtient une décharge d'arc ou (arc électrique) à partir d'une tension modérée d'une dizaine de volts. Les décharges dans les gaz sont dues à l'apparition d'électrons et d'ions libres.

3/ Equation de Boltzmann

La modélisation mathématique d'une décharge électrique est relativement complexe à cause des nombreux phénomènes mis en jeu et de leur fort couplage, par exemple celui entre la variation des densités de particules chargées et celle du champ électrique. Dans les conditions de décharge luminescente, le degré d'ionisation est inférieur à quelques 10^{-5} .

L'importance relative de chaque interaction est directement proportionnelle au produit des densités des particules entrant en jeu. Le degré d'ionisation étant très faible, les collisions entre particules chargées peuvent être négligées. Il est évidemment impossible de décrire dans une décharge luminescente le mouvement de chaque particule. Pour éviter cela, on introduit la notion de fonction de distribution pour chaque espèce, celle-ci étant obtenue en résolvant l'équation de Boltzmann :

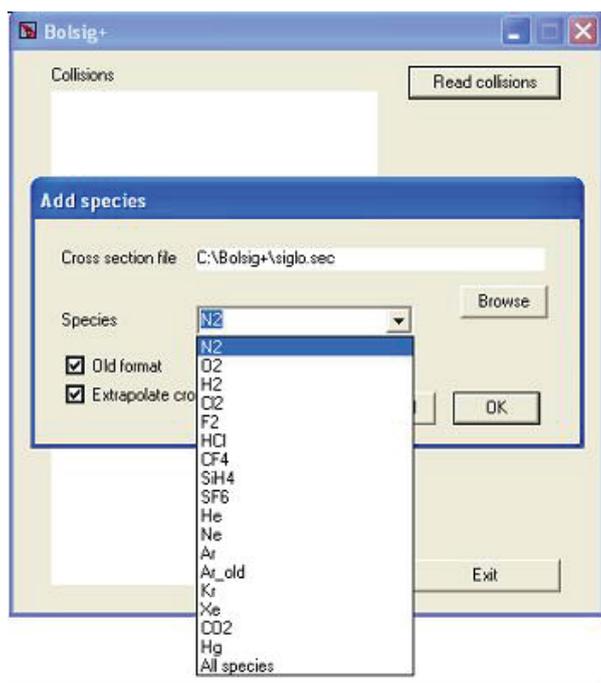
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_r + \frac{\vec{F}}{m} \cdot \nabla_v\right) f(\vec{r}, \vec{v}, t) = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{collisions} \quad (1)$$

où $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ est la fonction de distribution (*réellement la fonction du densité de probabilité*) pour les électrons à l'instant t et à la position r avec la vitesse v . Elle représente le nombre de particules dont la position r et la vitesse v se trouvent dans l'élément de volume ($d^3r d^3v$) autour du point (r, v) au temps t .

4/ Coefficients de transport électronique d'un gaz

La résolution numérique de l'équation de Boltzmann pour les électrons d'un gaz faiblement ionisé, dans le cas stationnaire et pour un champ électrique uniforme, en tenant compte de tous les processus de collision possibles : collisions super-élastiques, collisions électron-électron et collisions électron-ion, sert à déterminer les fonctions de distribution électroniques dans le cas d'un gaz pur ou d'un mélange gazeux. La connaissance de ces fonctions de distribution permet de calculer les coefficients de transport électronique et les taux de toutes les réactions considérées dans le gaz.

5/ L'environnement de logiciel Bolsig+



Bolsig+ est un logiciel facile à utiliser pour la résolution numérique de l'équation de Boltzmann pour les électrons dans un gaz faiblement ionisé et pour un champ uniforme.

Dans le fichier siglo.sec fourni avec **Bolsig+**, on trouve toutes les données électroniques nécessaires concernant les collisions via les variations de sections efficaces pour les processus considérés en fonction de l'énergie de l'électron incident (*collisions élastiques, excitation des niveaux optiques, dissociation éventuellement, ionisation et attachement, sans oublier les rotations et vibrations dans le cas des molécules*). En plus de la fonction de distribution en énergie des électrons (**FDEE**), **Bolsig+** calcule les coefficients de transport et les taux de réactions nécessaires pour la description fluide des décharges électriques. Citons à titre d'exemples :

- Energie moyenne ϵ
- Mobilité $\times N$
- Coefficient de diffusion $\times N$
- Fréquence totale de collision $\times N$
- Taux de réactions
- Coefficient de Townsend

où N est la densité totale du gaz.

6/ Constantes universelles

Célérité de la lumière c	$299\,792\,458\, m\,s^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12}\, A^2\,s^4\,k\,g^{-1}\,m^{-3}$
Perméabilité du vide μ_0	$1.25664 \times 10^{-6}\, NA^{-2}$
Constante de Planck h	$6.626 \times 10^{-34}\, J.s$
Charge élémentaire e	$1.602 \times 10^{-19}\, A.s$
Constante de Boltzmann k_B	$1.380 \times 10^{-23}\, JK^{-1}$
Masse de l'électron m_e	$9.109 \times 10^{-31}\, kg$
Masse du proton m_p	$1.672 \times 10^{-27}\, kg$

7/ Conversion des unités

1 bar	100 000 Pa
1 atm	101 325 Pa
1 torr	133.322 Pa
1 eV	$1.602 \times 10^{-19}\, J$
1 Td	$10^{-17}\, V.cm^2$

III TP N° 1 : FONCTION DE DISTRIBUTION

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

Objectif du TP

Détermination de la fonction de distribution en fonction de l'énergie moyenne pour différents champs électriques réduit E/N (Td).

1/ Partie théorique

L'équation d'évolution de la fonction de distribution des électrons s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \vec{\gamma} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll} \quad (2)$$

1. Définir chaque terme de l'équation de Boltzmann
2. Que représente la fonction de distribution.
3. La fonction de distribution à l'équilibre thermodynamique est-elle maxwellienne :
 - Donner l'expression de cette fonction.
 - Représenter l'allure de cette fonction sur un papier millimétré.

2/ Manipulation

1. Pour des valeurs du champ électrique réduit E/N (Td) comprises entre 1 et 200 Td, calculer la fonction de distribution f en fonction de l'énergie moyenne (le gaz plasmagène est le nitrogène N_2) ?

ϵ (eV)										
f ($eV^{-3/2}$)										

2. Pour les mêmes valeurs du champ électrique réduit, calculer la fonction de distribution f en fonction de l'énergie moyenne pour les gaz suivants : O_2 , Xe , Ne , Ar ?
3. Tracer les courbes de la fonction de distribution pour chaque gaz ?
4. Commenter tous les courbes obtenues, et donner l'explication physique de ces courbes ?

IV TP N° 2 : VITESSE DE DÉRIVE

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

Objectif du TP

Calcul de la vitesse de dérive des électrons en fonction du champ électrique réduit E/N .

1/ Partie théorique

1. Donner la définition exacte de la vitesse de dérive v_d ?
2. Donner sa formule mathématique ?
3. Quelle est la différence entre la vitesse de dérive et la vitesse thermique ?

2/ Manipulation

1. Pour des valeurs du champ électrique réduit comprises entre 1 et 200 Td , calculer la vitesse de dérive v_d en fonction du champ réduit E/N (le gaz plasmagène est le oxygène O_2) ?

$E/N(Td)$										
$v_d(cm/s)$										

2. Faites le même calcul pour les gaz suivants : Xe, Ne, Ar, N_2
3. Tracer les courbes $V_d = f(E/N)$. Commenter les graphes ?
4. Comparer les différentes courbes de la vitesse de dérivé pour les cinq gaz étudiés ?

V TP N° 3 : ENERGIE MOYENNE

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

Objectif du TP

Calcul de l'énergie moyenne des électrons en fonction du champ électrique réduit E/N .

1/ Partie théorique

1. Que représente l'énergie moyenne électronique ?
2. Donner l'expression exacte de l'énergie moyenne ?

2/ Manipulation

1. En utilisant le **Bolsig+**, déterminer l'énergie moyenne ϵ en fonction du champ électrique réduit E/N dans l'intervalle 1 à 200 Td. Le gaz plasmagène est le xénon Xe.

$E/N(Td)$										
$\epsilon(eV)$										

2. Remplir le tableau pour les gaz : N_2 , O_2 , Ne , Ar ?
3. Tracer les courbes $\epsilon = f(E/N)$?
4. En comparant les différents gaz, indiquer l'énergie moyenne la plus grande ?

VI TP N° 4 : COEFFICIENT D'IONISATION

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

Objectif du TP

Calcul du premier coefficient de Townsend, nommé aussi le coefficient d'ionisation, en fonction du champ électrique réduit E/N .

1/ Partie théorique

1. Que représente physiquement le coefficient d'ionisation dans une décharge électrique ?
2. Ecrire la relation entre la fréquence d'ionisation ν_i et le coefficient d'ionisation α ?
3. La formule analytique du coefficient d'ionisation (*cas du néon*) est donnée par l'expression :

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{B}{E/N}\right) \quad (3)$$

avec $A=8.2 \text{ cm}^{-1}\text{torr}^{-1}$ et $B=17 \text{ V}^{-1/2}\text{cm}^{-1/2}\text{torr}^{-1/2}$. Tracer le graphe $\alpha = f(E/N)$?

2/ Manipulation

1. Faites un calcul numérique dans le **Bolsig+**, pour déduire le premier coefficient de Townsend α en fonction du champ réduit (E/N varie entre 1 et 200 Td). Le gaz plasmagène est l'argon Ar .

$E/N(\text{Td})$										
$\alpha(\text{cm}^{-1})$										

2. En utilisant toujours le **Bolsig+**, calculer le coefficient d'ionisation α pour les gaz : N_2 , O_2 , Xe , Ne .
3. Tracer les courbes $\alpha = f(E/N)$. Commenter les courbes ?
4. Si nous comparons tous les gaz, quel est le coefficient le plus élevé et pourquoi ?
5. Faites une comparaison entre les résultats obtenus par la théorie (relation 3) et ceux trouvés par le **Bolsig+** pour le cas du gaz néon. Que remarquez-vous ?

VII TP N° 5 : CALCUL DES COEFFICIENTS DE TRANSPORT ÉLECTRONIQUE POUR UN MÉLANGE GAZEUX ($N_2 - O_2$)

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

Objectif du TP

Calcul des coefficients de transport électronique en fonction du champ électrique réduit E/N pour un mélange gazeux ($N_2 - O_2$) et mise en évidence de l'influence de la composition du mélange sur ces coefficients.

1/ Partie théorique

1. Du point de vue technique, les mélanges gazeux ($N_2 - O_2$) interviennent dans de nombreuses applications. Quelle sont ces applications (*en détails*) ?
2. Quel est l'avantage de ce mélange gazeux ?

2/ Manipulation

1. Pour des valeurs du champ électrique réduit E/N comprises entre 1 et 200 Td, calculer la fonction de distribution f et les coefficients de transport pour un mélange $N_2 - O_2$: 80%-20%. Tracer ensuite les courbes correspondantes ?

$\epsilon(eV)$										
$f(eV^{-3/2})$										

$E/N(Td)$										
$\epsilon(eV)$										
$\alpha(cm^{-1})$										
$v_d(cm/s)$										

2. Faites le même travail pour calculer tous les coefficients de transport ainsi que la fonction f , pour des pourcentages de O_2 : 5,10, 20%.
3. Tracer les variations des grandeurs ϵ , α et v_d en fonction du champ réduit E/N et pour les différents pourcentages de l'oxygène O_2 .
4. Que remarquez-vous ?

VIII TP N° 6 : CALCUL DES COEFFICIENTS DE TRANSPORT ÉLECTRONIQUE POUR UN MÉLANGE GAZEUX ($Ne - Xe$)

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

Objectif du TP

Calcul de la fonction de distribution et les coefficients de transport électronique en fonction du champ électrique réduit E/N pour un mélange gazeux ($Ne - Xe$).

1/ Partie théorique

1. Citer l'avantage d'utiliser un mélange composé de ces deux gaz (*xénon & néon*) ?
2. Quel est le gaz le plus facile à ioniser. Pourquoi ?

2/ Manipulation

1. Pour des valeurs du champ électrique réduit E/N comprises entre 1 et 200 Td, calculer la fonction de distribution f et les coefficients de transport pour un mélange $Ne - Xe$: 90%-10%.

$\epsilon(eV)$										
$f(eV^{-3/2})$										

$E/N(Td)$										
$\epsilon(eV)$										
$\alpha(cm^{-1})$										
$v_d(cm/s)$										

2. Répéter le calcul en variant le pourcentage du xénon : 20, 30, 40, 50% ?
3. Quelle est l'influence du pourcentage sur les coefficients de transport ?
4. Commenter les graphes ?