

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

# نموذج مطابقة و مواءمة

عرض تكوين ماستر أكاديمي  
2026 – 2025

| التخصص          | الشعبة   | ميدان       |
|-----------------|----------|-------------|
| فيزياء البلازما | الفيزياء | علوم المادة |

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

# **Canevas de mise en conformité et harmonisation**

## **OFFRE DE FORMATION**

**L.M.D. MASTER ACADEMIQUE**

**2025 – 2026**

| <b>Domaine</b>                    | <b>Filière</b>  | <b>Spécialité</b>           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| <b>SCIENCES<br/>DE LA MATIERE</b> | <b>PHYSIQUE</b> | <b>PHYSIQUE DES PLASMAS</b> |

# Master Physique des Plasmas

## Semestre 1

| Unité d'Enseignement                                               | Matières                                                        | VHS<br>15<br>semaines | V.H hebdomadaire |       |       | Autres* | Coeff | Crédits | Mode d'évaluation |        |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-------|-------|---------|-------|---------|-------------------|--------|
|                                                                    | Intitulé                                                        |                       | Cours            | TD    | TP    |         |       |         | Continu           | Examen |
| UE Fondamentale<br>Code : UEF 1<br>Crédits : 18<br>Coefficient : 9 | Propriétés fondamentales des plasmas                            | 67h30                 | 03h00            | 01h30 | /     | 82h30   | 3     | 6       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Physique atomique I                                             | 67h30                 | 03h00            | 01h30 | /     | 82h30   | 3     | 6       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Physique des rayonnements                                       | 45h00                 | 01h30            | 01h30 | /     | 55h00   | 2     | 4       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Dynamique des fluides                                           | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 27h30   | 1     | 2       | 33%               | 67%    |
| UE Méthodologie<br>Code : UEM 1<br>Crédits : 9<br>Coefficient : 5  | Intelligence artificielle et Machine Learning 1                 | 15h00                 |                  | /     | 01h00 | 10h00   | 1     | 1       | 50%               | 50%    |
|                                                                    | Décharges électriques dans les gaz                              | 45h00                 | 01h30            | /     | 01h30 | 55h00   | 2     | 4       | 50%               | 50%    |
|                                                                    | Plasma et conversion d'énergie                                  | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 27h30   | 1     | 2       | /                 | 100%   |
|                                                                    | Transfert thermique                                             | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 27h30   | 1     | 2       |                   | 100%   |
| UE Découverte<br>Code : UED 1<br>Crédits : 2<br>Coefficient : 2    | Chimie des plasmas                                              | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 2h30    | 1     | 1       | /                 | 100%   |
|                                                                    | Plasma pour l'environnement                                     | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 2h30    | 1     | 1       | /                 | 100%   |
| UE Transversale<br>Code : UET 1<br>Crédits : 1<br>Coefficient : 1  | Exploration de Logiciels libres et open source de la spécialité | 22h30                 |                  | /     | 01h30 | 2h30    | 1     | 1       | 50%               | 50%    |
| Total Semestre 1                                                   |                                                                 | 375h00                | 16h30            | 04h30 | 04h00 | 375h00  | 17    | 30      |                   |        |

Autres\* : Travail complémentaire en consultation semestrielle.

# Master Physique des plasmas

## Semestre 2

| Unité d'Enseignement                                               | Matières                                        | VHS<br>15<br>semaines | V.H hebdomadaire |       |       | Autres* | Coeff | Crédits | Mode d'évaluation |        |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-------|-------|---------|-------|---------|-------------------|--------|
|                                                                    | Intitulé                                        |                       | Cours            | TD    | TP    |         |       |         | Continu           | Examen |
| UE Fondamentale<br>Code : UEF 2<br>Crédits : 18<br>Coefficient : 9 | Eléments de physique statistique hors équilibre | 67h30                 | 3h00             | 1h30  | /     | 82h30   | 3     | 6       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Ondes dans les plasmas et Magnétohydrodynamique | 67h30                 | 3h00             | 1h30  | /     | 82h30   | 3     | 6       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Physique atomique II                            | 67h30                 | 3h00             | 1h30  | /     | 82h30   | 3     | 6       | 33%               | 67%    |
| UE Méthodologie<br>Code : UEM2<br>Crédits : 9<br>Coefficient : 5   | Analyse numérique I                             | 45h00                 | 1h30             |       | 1h30  | 55h00   | 2     | 4       | 50%               | 50%    |
|                                                                    | Intelligence artificielle et Machine Learning 2 | 15h00                 |                  |       | 1h00  | 10h00   | 1     | 1       | 50%               | 50%    |
|                                                                    | Spectroscopie dans les plasmas                  | 45h00                 | 1h30             | /     | 1h30  | 55h00   | 2     | 4       | 50%               | 50%    |
| UE Découverte<br>Code : UED2<br>Crédits : 2<br>Coefficient : 2     | <b>Deux matières au choix :</b>                 |                       |                  |       |       |         |       |         |                   |        |
|                                                                    | -Les lasers et leurs Applications               | 22h30                 | 1h30             | /     | /     | 2h30    | 1     | 1       | /                 | 100%   |
|                                                                    | -Procédés plasma et nouvelles applications      | 22h30                 | 1h30             |       |       | 2h30    | 1     | 1       |                   | 100%   |
|                                                                    | -Introduction à la fusion inertielle            |                       |                  |       |       |         |       |         |                   |        |
| UE Transversale<br>Code : UET2<br>Crédits : 1<br>Coefficient : 1   | Applications métallurgiques des plasmas         | 22h30                 | 1h30             | /     | /     | 2h30    | 1     | 1       | /                 | 100%   |
| Total Semestre 2                                                   |                                                 | 375h00                | 16h30            | 04h30 | 04h00 | 375h00  | 17    | 30      |                   |        |

Autres\* : Travail complémentaire en consultation semestrielle.

# Master Physique des plasmas

## Semestre 3

| Unité d'Enseignement                                               | Matières                                                 | VHS<br>15<br>semaines | V.H hebdomadaire |       |       |         | Coeff | Crédits | Mode d'évaluation |        |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-------|-------|---------|-------|---------|-------------------|--------|
|                                                                    | Intitulé                                                 |                       | Cours            | TD    | TP    | Autres* |       |         | Continu           | Examen |
| UE Fondamentale<br>Code : UEF 3<br>Crédits : 18<br>Coefficient : 9 | Etude des plasmas Thermiques                             | 67h30                 | 03h00            | 01h30 | /     | 82h30   | 3     | 6       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Confinement magnétique des plasmas de fusion             | 67h30                 | 03h00            | 01h30 | /     | 82h30   | 3     | 6       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Etude des Plasmas froids hors équilibre                  | 45h00                 | 01h30            | 01h30 | /     | 55h00   | 2     | 4       | 33%               | 67%    |
|                                                                    | Interaction laser –matière                               | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 27h30   | 1     | 2       | 33%               | 67%    |
| UE Méthodologie<br>Code : UEM3<br>Crédits : 9<br>Coefficient : 5   | Analyse numériques II                                    | 45h00                 | 01h30            | /     | 01h30 | 55h00   | 2     | 4       | /                 | 100%   |
|                                                                    | Intelligence artificielle Approfondis                    | 37h30                 | 01h30            | /     | 01h00 | 37h30   | 2     | 4       | /                 | 100%   |
|                                                                    | Accélération des particules par interaction laser-plasma | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 27h30   | 1     | 1       | /                 | 100%   |
| UE Découverte<br>Code : UED3<br>Crédits : 2<br>Coefficient : 2     | Plasma Astrophysique et Milieu Interstellaire            | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 2h30    | 1     | 1       | /                 | 100%   |
|                                                                    | Plasmas froids pour la médecine                          | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 2h30    | 1     | 1       | /                 | 100%   |
| UE Transversale<br>Code : UET3<br>Crédits : 1<br>Coefficient : 1   | Entrepreneuriat, Startup et Innovation                   | 22h30                 | 01h30            | /     | /     | 2h30    | 1     | 1       | /                 | 100%   |
| Total Semestre 3                                                   |                                                          | 375h00                | 18h00            | 04h30 | 02h30 | 375h    | 17    | 30      |                   |        |

Autres\* : Travail complémentaire en consultation semestrielle.

# Programmes

**Adapter le programme des cours et travaux dirigés (TD) en fonction du volume horaire hebdomadaire présentiel (VHH présentiel) et du volume horaire hebdomadaire personnel (VHH personnel).**

---

## **Programme détaillé par matière du semestre S1**

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEF 1**

**Matière 1: Propriétés fondamentales des plasmas**

**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement:**

Ce module vise à donner aux étudiants les connaissances de base sur le quatrième état de la matière, du plasma faiblement ionisé à basse température au plasma de fusion thermonucléaire : propriétés, équations de base, création d'un plasma, processus élémentaires,

### **Connaissances préalables recommandées:**

Mécanique classique – Electromagnétisme - physique statistique - Structure de la matière

### **Contenu de la matière:**

#### **Chapitre I : Introduction au plasma (3 semaines)**

I-1 Introduction

1.2 Définition et nature essentielle du plasma

I.2.1. Caractéristiques distinctives (quasi-neutralité, degré d'ionisation)

I.2.2. Exemples naturels et technologiques

1.3. Production d'un plasma

I.4. Classification des plasmas

1.5. Domaines d'étude et d'applications (exemples)

1.6. Décharge électriques en laboratoire

#### **Chapitre II : Comportement collectif du plasma (3 semaines)**

II-1 Introduction

II.2 Oscillations de plasma

III.2.1 Description qualitative

III.2.2 Description quantitative

II.3 Phénomènes collectif dans les plasmas

III.3.1 Longueur de Landau

III.3.2 Longueur de Debye

III.3.2 Longueur exacte de Debye

III.4 Classification des plasmas

#### **Chapitre III : Interactions plasma-champ électromagnétique (3 semaines)**

III-1. Introduction

III-2. Equation de mouvement des particules chargées

III-2-1. Cas d'un champ électrique et champ magnétique nul

III-2-2. Cas d'un champ magnétique longitudinal

III-2-3. Cas d'un champ magnétique transversal

III-3 Champ magnétique uniforme et constant et électrique oscillant

III-4 Champ magnétique lentement variable. Orbites adiabatiques

## **Chapitre IV : Collisions élastiques (3 semaines)**

### V-1. Introduction

Rôle fondamental des collisions dans les plasmas

### V-2 Les deux types de collision qui se produisent dans le plasma

#### V-2 Typologie des collisions élastiques

1. Collisions entre particules chargées (Coulombiennes)
2. Collisions entre particules chargées et neutres

Grandeurs caractéristiques d'une collisions

### V-4. Section efficace de collision

Section efficace de collision, Section efficace différentielle ,

Fréquence de collision , Libre parcours moyen

### V-3. Traitement classique des Collisions élastiques binaires

#### V-3-1. Description du mouvement relatif

#### V-3-2. Paramètre d'impact et angle de déviation

### V-4. Section efficace de collision

#### V-4-3 Section efficace et paramètre d'impact

### V-5 Collisions élastiques coulombiennes

## **Chapitre V : Collisions inélastiques (3 semaines)**

### V-1 Définition des collisions inélastiques

- Perte d'énergie cinétique transformée en énergie interne - Différence avec les collisions élastiques

### V-2 Importance dans les plasmas

- Mécanisme de génération et de perte d'électrons- Rôle dans l'excitation, l'ionisation, la recombinaison - Interactions plasma-rayonnement

### V-3 Particules présentes dans un plasma niveaux d'énergie- Seuils de collisions

### V-4 Section efficace et taux de réaction

### V-5 Mécanismes principaux des collisions inélastiques

#### V-5-1 Excitation électronique

#### V-5-2. Ionisation par impact électronique

#### 5. Attachement électronique

#### V-5-3. Recombinaison

#### V-5-4. Collisions inélastiques ion-ion / ion-neutre

#### V-5-5. Échange de charge (charge exchange) - Ionisation par impact ionique

## **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33% ; Examen: 67%.

## **Références bibliographiques :**

- 1- Physique des plasmas tomes 1 et 2 Delcroix J.L., Bers A. 1994
- 2- Physique des plasmas Cours et applications Jean-Marcel Rax, Bernard Bigot
- 3- Fundamentals of plasma physics Bittencourt J.A. 1986
- 4- Phénomènes électriques dans les gaz Papoular R. 1963
- 5- Transport phenomena in partially ionized plasma Rozhansky, V.A. 2001
- 6- Fundamentals of plasma physics Seshadri S.R. 1973
- 7- Physics of ionized gases Smirnov, B. M. 2001
- 8- Introduction to plasma physics richard Fitzpatrick 1998
- 9- Principles of plasma processing Francis F. Chen Jane P. Chang 2002

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEF 1**

**Matière 2: Physique atomique I.**

**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement:**

Dans cette matière sont enseignés les fondements de la structure des atomes et ions positifs et leurs interactions avec des champs extérieurs magnétique et électrique. Ces fondements sont requis dans la compréhension des processus radiatifs et collisionnels dans les plasmas.

**Connaissances préalables recommandées:**

Mécanique Quantique, Mécanique Quantique II, et Physique Atomique (enseignés en L2 Physique, semestre 4, et L3 Physique, semestres 5 et 6, respectivement).

**Contenu de la matière:**

**Chapitre I– Absorption et émission de radiation par les atomes (4 semaines)**

- I-1 Niveaux d'énergie discrets dans un atome. Spectre de raies
- I-2 Absorption, émission spontanée, émission induite
  - 1) Coefficients d'Einstein
  - 2) Confirmations expérimentales des trois processus radiatifs
  - 3) Ordres de grandeur
- I-3 Calcul théorique des coefficients d'Einstein
  - 1) Principes
  - 2) Cas de l'atome d'hydrogène ou ions hydrogénoïdes
  - 3) Règles de sélection pour le cas de H

**Chapitre II– Interaction spin-orbite (5 semaines)**

- II-1 Introduction
- II-2 Moments magnétiques de l'électron
  - 1) Moment magnétique orbital
  - 2) Moment magnétique de spin
- II-3 Opérateur d'interaction spin-orbite
  - 1) Méthode élémentaire pour l'hydrogène
  - 2) Méthode pour les atomes alcalins
- III-4 Niveaux des atomes alcalins
  - 1) Etats propres de l'Hamiltonien
  - 2) Energies propres
  - 3) Exemple et notation spectroscopique
  - 4) Règles de sélection des transitions radiatives
- III-5 Interaction spin-orbite dans les atomes à plusieurs électrons
  - 1) Cas des atomes légers
  - 2) Règle des intervalles de Landé
  - 3) Cas des atomes plus lourds
  - 4) Règles de sélection des transitions radiatives

### **Chapitre III– Action d'un champ magnétique extérieur sur les atomes. Effet Zeeman (3 semaines)**

- III-1 Introduction
- III-2 Hamiltonien Zeeman
- III-3 Cas du champ magnétique fort (effet Paschen-Back)
- III-4 Cas du champ magnétique faible (effet Zeeman)
- III-5 Polarisation des transitions Zeeman

### **Chapitre IV– Action d'un champ électrique extérieur sur les atomes. Effet Stark (3 semaines)**

- IV-1 Introduction
- IV-2 Hamiltonien Stark
- IV-3 Champs faibles. Effet Stark quadratique
- IV-4 Champs forts. Effet Stark linéaire
- IV-5 Effet Stark dans l'atome d'hydrogène. Application au niveau  $n=2$

#### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

#### **Références bibliographiques :**

- 1- *Physique Atomique*, Tome 1, Cagnac B., Tchang-Brillet L., Pebay-Peyroula J.-C. (Dunod 2005).
- 2- *Physique Atomique*, Tome 2, Cagnac B., Tchang-Brillet L., Pebay-Peyroula J.-C. (Dunod 2007).
- 3- *Physique atomique*, Tome 2, Chpolski E. (Mir 1978).
- 4- *Atoms and Molecules*, Weissbluth M. (Academic Press 1978).
- 5- *The Theory of Atomic Structure and Spectra*, Cowan R.D. (University of California Press 1981).
- 6- *The Theory of Atomic Spectra*, Condon E.U., Shortley G.H. (Cambridge University Press 1963).
- 7- *Spectroscopie atomique*, Biémont E. (De Boeck, 2008).

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEF 1**

**Matière 1: Physique des rayonnements**

**VHS: 45h00 (Cours: 1h30, TD: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement:**

Dans cette partie sont enseignées les notions de base du rayonnement électromagnétique, les grandeurs caractéristique du rayonnement et le rayonnement thermique et la loi du Corps Noir

### **Connaissances préalables recommandées:**

Mécanique quantique – Structure de la matière, Physique atomique

### **Contenu de la matière:**

#### **Chapitre I Notions générales sur les rayonnements (2 semaines)**

- I-1. Définitions, nature et origine des rayonnements
- I-2. Unités et grandeurs caractérisant les rayonnements
- I-3. Dualité onde-particule
- I-4. Aspects ondulatoire et corpusculaire des rayonnements
  - Classifications des rayonnements

#### **Chapitre II Grandeurs caractéristique des rayonnements (3 semaines)**

- II-1. Grandeurs géométriques
  - Angle solide  $\Omega$  - Étendue géométrique d'un faisceau
- II-2. Grandeurs radiométriques
  - Flux énergétique - Luminance énergétique - Intensité énergétique
  - Émittance énergétique - Énergie volumique et flux sphérique .
- II-3. Loi de Lambert pour une source hémisphérique .

#### **Chapitre III Rayonnement du corps noir (3 semaines)**

- 1 Définition, propriétés du corps noir .
- 2.Loi de Kirchhoff – émissivité .
- 3. Luminance du corps noir .
- 4. Loi de Planck : luminances spectrales
- 5. Luminance et émittance énergétiques totales : loi de Stefan
- 6. Loi de Wien : déplacement du maximum de  $B\lambda$   
Déplacement du maximum de  $B\nu$  .
- 7. Formes asymptotiques de la loi de Planck .
- Températures radiatives - Température équivalente d'émission - Température monochromatique de brillance .

#### **Chapitre IV Le rayonnement des corps réels (3 semaines)**

- 1. Facteurs d'émissions des corps réels
- 2. Définition des déférentes émissivités
- 3. Emissivité' des corps usuels
- 4. Absorption des corps usuels .
- 5. Loi de Kirchhoff
- 6. Absorptivité' totale
- 7. Applications

## **Chapitre V Corps en influence partielle (2 semaines)**

1. Flux échange' entre deux surfaces noires isothermes, séparées par un milieu transparent.
2. Facteurs de forme
3. Calcul des facteurs de forme pour quelques conurbations . . .

## **Chapitre VI : échanges radiatifs (2 semaines)**

- Facteur de forme
- Surfaces en influence partielle

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

### **Références bibliographiques :**

Rayons Santé, « [Le rayonnement électromagnétique \(définition\)](#) » [[archive](#)], sur [www.rayons-sante.com](http://www.rayons-sante.com) (consulté le 30 octobre 2014).

[Les ondes électromagnétiques](#) [[archive](#)], sur le site [univ-paris1.fr](http://univ-paris1.fr), consulté le 8 décembre 2013

Web Sciences, « [Modèle ondulatoire de la lumière](#) » [[archive](#)], sur [www.web-sciences.com](http://www.web-sciences.com) (consulté le 4 novembre 2014)

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEF 1**

**Matière 2 : Dynamique des fluides**

**VHS: 22h30 (Cours: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement:**

Dans cette partie sont enseignées les trois modes de transfert thermique applications à la physique des plasmas et à la physique des rayonnements et aussi la dynamique des fluides qui est la base des phénomènes qui se produisent dans les plasmas

**Connaissances préalables recommandées** (*descriptif succinct des connaissances requises pour pouvoir suivre cet enseignement – Maximum 2 lignes*).

Thermodynamique – rayonnement – phénomène de transport – mécanique des fluides

### **Contenu de la matière**

#### **Chapitre 1 : Notions préliminaires** (4 semaines)

- 1.1. Rappels Mathématiques et Eléments d'analyse vectorielle :
- 1.2. Rappels des équations de Maxwell
- 1.3. 1.2 Structure des fluides (fluide dense, fluide raréfié, nombre de Knudsen)
- 1.3 Propriétés therophysiques des fluides continus
- 1.4 Régimes thermodynamiques (sous critique, transcritique et supercritique)
- 1.5 Régimes d'écoulements (Nombre de Mach) et morphologie (nombre de Reynolds)
- 1.6 Eléments de rhéologie

#### **Chapitre 2 : Description d'un fluide en mouvement** (4 semaines)

- 3.1 Approche Lagrangienne
- 3.2 Approche Eulérienne

#### **Chapitre 3 : Equations de conservation** (4 semaines)

- 2.1 Conservation de la masse ; équation de continuité
- 2.2 Conservation de la quantité de mouvement ;
- 2.3 Cas particuliers
- 2.4 Décomposition des équations de conservation : Reynolds, Favre
- 2.5 Tenseur moyen des contraintes visqueuses
- 2.6 Tenseur des contraintes de Reynolds et flux turbulent de l'enthalpie massique
- 2.7 Conservation de l'énergie

#### **Chapitre 4 : Modélisation des écoulements des plasmas** (4 semaines)

- 4.1 Approche particulière
- 4.2 Approche cinétique (Equation de Boltzmann ; Equation de Vlasov)
- 4.3 Approche fluide (Etat d'équilibre thermodynamique ; Maxwellienne ; Limites de l'approche fluide, Equations de bilans ; Fermeture des équations de bilan)
- 4.4 Modélisation multifluides

**Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

**Références bibliographiques :**

[G. Batchelor](#) (1967) *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press  
([ISBN 0521663962](#))

[E. Guyon](#), J-P. Hulin, L. Petit (1991) *Hydrodynamique physique*, Savoirs Actuels ([ISBN 2868835023](#))

[L. Landau](#) et [E. Lifshitz](#) (1998) *Mécanique des fluides*, Ellipses, ([ISBN 2729894233](#))

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEM 1**

**Matière 2 : Intelligence artificielle et Machine Learning 1**

**VHS : 60h VHS: 15h00 (TP: 1h00)**

### **Objectifs du cours :**

Introduire les bases de l'IA et de l'apprentissage automatique (Machine Learning), en se concentrant sur leurs applications dans les sciences de la matière. Les étudiants comprendront les concepts fondamentaux de la modélisation basée sur les données et comment appliquer les techniques de l'apprentissage automatique pour résoudre des problèmes du monde réel.

### **Contenu du cours :**

- **Chapitre 1 : Introduction à l'IA et à l'apprentissage automatique**  
Aperçu de l'IA et de ses applications.  
Importance des données dans l'IA et l'apprentissage automatique.
- **Chapitre 2 : Concepts de base de l'apprentissage automatique**  
Apprentissage supervisé ou non supervisé.  
Algorithmes clés de l'apprentissage automatique : régression, classification, regroupement.  
Mesures d'évaluation (MAE,  $R^2$ , précision).
- **Chapitre 3 : Collecte et traitement des données**  
Ingénierie des caractéristiques et techniques de prétraitement des données.  
Traitement de l'ajustement excessif et de l'ajustement insuffisant.  
Bases de données sur les matériaux : Materials Project, OQMD, AFLOW.
- **Chapitre 4 : Apprentissage automatique (Machine Learning) pratique en sciences de la matière**  
Étude de cas : Prédiction des propriétés des matériaux (bande interdite, etc.).  
Utilisation de modèles d'apprentissage automatique pour des tâches simples de classification et de régression.
- **Chapitre 5 : Fondements de l'apprentissage profond**  
Introduction aux réseaux neuronaux.  
Principaux cadres d'apprentissage profond : TensorFlow, Keras, PyTorch.  
Application : Prédiction de la structure cristalline à l'aide de réseaux neuronaux.

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 50 % ; Examen: 50 %.

### **Bibliographie :**

- *"Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow"* by Aurélien Géron (focuses on practical applications of machine learning)
- *"Pattern Recognition and Machine Learning"* by Christopher M. Bishop (provides theoretical foundations of ML)

### **Outils et bibliothèques :**

- Python, Jupyter Notebooks
- Scikit-learn, Pandas, Matplotlib
- Materials science tools: Matminer, Pymatgen

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEM 1**

**Matière 2 : Décharges électrique dans les gaz**

**VHS : 45h (Cours: 1h30, TP: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement:**

Comprendre les phénomènes physiques associés aux décharges électriques dans les gaz, leur classification, leur modélisation et leurs applications.

**Connaissances préalables recommandées:**

Electricité - physique statistique - Structure de la matière

**Contenu de la matière:**

**Chapitre I. Introduction générale** (3 semaines)

- I-1. Historique et intérêt des décharges électriques
- I-2. Applications (lampes à décharge, plasma froid, propulsion, traitement de surface, etc.)
- I-3. Rappels sur les gaz parfaits et ionisation
  - I-3-1. Pression, température, libre parcours moyen.
  - I-3-2. Régidité électrique des gaz
  - I-3-3. Mécanismes d'ionisation (collisions électroniques, photoionisation).
- I-4. Équation de Boltzmann pour les électrons

**Chapitre II. Théorie de Townsend** (2 semaines)

- II-1. Ionisation par avalanche électronique
- II-2. Coefficients de Townsend ( $\alpha$ ,  $g$ )
- II-3. Condition d'amorçage de la décharge
- II-4. Décharge auto-entretenue
- II-5 Courbe tension-courant.
- II-6 Courbe de Paschen - Tension disruptive et effet de la pression.

**Chapitre III Régimes autonomes de Décharges** (3 semaines)

- III-1. Décharge luminescente
  - III-1-1. Régimes : pré-décharge, décharge normale, décharge anormale
  - III-1-2. Distribution du potentiel (cathode, espace négatif brillant)
  - III-1-3. Émission lumineuse et spectres
  - III-1-4. Applications (tubes néon, lasers à gaz).
- III-2. Décharge à arc
  - III-2-1. Formation et maintien de l'arc électrique
  - III-2-2. Effets thermiques et rayonnement
  - III-2-3. Applications industrielles (soudure, éclairage)

**Chapitre IV Décharges à basse pression et plasmas froids** (2 semaines)

- IV-1. Décharges radiofréquence (RF)
- IV-2. Décharges micro-ondes
- IV-3. Plasma capacitif et inductif
- IV-4. Caractéristiques des plasmas non thermiques

## **Chapitre V. Décharges impulsives (2 semaines)**

V-1. Décharges à barrière diélectrique (DBD)

V-2. Décharges corona

V-3. Applications : ozone, traitement de surface, propulsion spatiale

## **Chapitre VI. Modélisation et Simulation (3 semaines)**

VI-1. Approches théoriques

- Équations de Boltzmann, modèle fluide.

VI-2. Outils numériques

- Logiciels de simulation (COMSOL, PIC-MCC).

### **Mode d'évaluation:**

5- Contrôle continu: 50 % ; Examen: 50 %.

### **Références bibliographiques :**

- Microwave discharges: fundamentals and applications Ferreira, C; Moisan, M 1993
- Décharge électrique dans les gaz Laporte M. 1975
- Glow discharge processes: sputtering and plasma etching Chapman B. 1980
- Gas discharge physics Raizer Y.P 1987
- Principles of plasmas discharges and materials processing Lieberman M. A., Lichtenberg A.J 1994
- Gaz ionisés: décharges des gaz électriques dans les gaz Badareu E. Popescu I. 1965
- Principles of discharges and materials processing Lieberman M Lichtenberg A 1994
- Simple dielectric liquids : mobility, conduction, and breakdown Gallagher T.J 1975
- Electricity in the atmosphere Imyamoto I.M., Chubarina E.V 1967
- Principe of P plasma discharge and material processing Michael A. Liebermann 1994

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEM 1**

**Matière 3 : Plasma et conversion d'énergie**

**VHS : 22.5 h (Cours: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement:**

- Comprendre les mécanismes physiques permettant aux plasmas de convertir différentes formes d'énergie.
- Étudier comment les plasmas interviennent dans la production, le transport et la transformation de l'énergie.

**Connaissances préalables recommandées:**

Physique générale, Bases en physique des plasmas, électromagnétisme

**Contenu de la matière:**

**1. Introduction générale (2 semaines)**

- Rôle des plasmas dans les technologies énergétiques modernes
- Types de conversions d'énergie assistées par plasma :
  - Conversion électromagnétique → cinétique
  - Conversion thermique → électrique
  - Conversion chimique → énergétique

**2. Bases physiques (2 semaines)**

- Équations de conservation dans un plasma : masse, quantité de mouvement, énergie
- Mécanismes de transfert d'énergie dans un plasma (collisionnel, radiatif)
- Énergie des électrons vs énergie globale du plasma

**3. Conversion d'énergie par propulsion plasma (2 semaines)**

- Principe de la propulsion ionique (grilles d'extraction, accélération d'ions)
- Propulseurs Hall, propulseurs à effet magnéto-plasma dynamique (MPD)
- Application à la propulsion spatiale (exemples : satellites, missions interplanétaires)

**4. Plasma et production d'énergie par fusion (2 semaines)**

- Concepts de fusion contrôlée (tokamaks, stellarators, fusion inertielle)
- Confinement magnétique et inertielle
- Conversion thermique issue de la fusion en électricité (chaleur → turbine → électricité)

**5. Plasmas pour conversion chimique d'énergie (2 semaines)**

- Réformes plasma : conversion du méthane, production d'hydrogène
- Gazéification plasma des biomasses
- Réacteurs plasmochimiques pour carburants propres (power-to-gas)

## **6. Conversion d'énergie thermique par plasma (3 semaines)**

- Génération de plasmas thermiques pour turbines
- Plasmas dans les moteurs à combustion plasma-assistée
- Conversion directe chaleur → électricité dans certains dispositifs plasma

## **7. Technologies émergentes (2 semaines)**

- Plasmas pour la capture et la conversion du CO<sub>2</sub> (plasma catalysis)
- Plasmas et stockage d'énergie (hydrogène, ammoniac vert)

### **Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

### **Références bibliographiques :**

1. Fridman, Alexander – "Plasma Physics and Engineering" Éditeur : CRC Press, 2<sup>e</sup> édition, 2014.
2. Goebel, Dan M., Katz, Ira – "Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters" Éditeur : Jet Propulsion Laboratory/John Wiley, 2008.
3. Wesson, John – "Tokamaks" Éditeur : Oxford Science Publications, 4<sup>e</sup> édition, 2011.
4. Fauchais, Pierre – "Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications" Éditeur : Springer, 2014.
5. Sarrailh, P. & al. – "Physics of Electric Propulsion" (cours ENSTA/IPT)

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UEM 1**

**Matière 4 : Transfert Thermique**

**VHS : 22.5 h (Cours: 1h30)**

## **Objectifs de l'enseignement**

Ce cours vise à fournir aux étudiants une compréhension approfondie des mécanismes de transfert de chaleur et des outils pratiques pour les analyser, les modéliser

## **Connaissances préalables recommandées**

Thermodynamique de base, analyse mathématique (équations différentielles), notmécanique des fluides, rayonnement

## **Contenu de la matière**

### **Chapitre I : INTRODUCTION À L'ÉNERGÉTIQUE ET AUX TRANSFERTS (3 semaines)**

- I-1. Quelques dénitrions nécessaires. .
- I-2. La nécessaire complémentarité entre thermodynamique et thermique.
  - La notion de température et la température d'un corps. - L'équilibre thermique.
  - Les chaleurs spécifiques - Chaleur latente de changement de phase
- I-3. Quelques bases sur les différents modes de transfert thermique
  - Conduction – Convection Rayonnement.
- I-4. Les principales notations et grandeurs du transfert thermique . . . .

### **Chapitre II : Conduction Thermique (3 semaines)**

- II-1. Loi de Fourier et équation de la chaleur
  - Loi de Fourier (flux thermique, gradient de température)
  - Conductivité thermique (propriétés des matériaux)
  - Équation de la chaleur en 1D, 2D et 3D (coordonnées cartésiennes, cylindriques, sphériques)
- II-2. Résolution de problèmes de conduction
  - Cas simples (paroi plane, cylindrique, sphérique)
  - Résistances thermiques (analogie électrique)
  - Conduction avec génération de chaleur (ex : réaction chimique, effet Joule)
- II-3. Conduction en régime transitoire
  - Nombre de Biot et Fourier
  - Méthode de l'analyse dimensionnelle (solutions analytiques et numériques)

## Chapitre III : Convection Thermique (3 semaines)

### III-1. Principes de base

- Mécanismes de la convection (forcée et naturelle)
- Couche limite thermique et hydrodynamique
- Coefficient de transfert convectif ( $h$ )

### III-2. Convection forcée

- Équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie)
- Corrélations empiriques (Nusselt, Reynolds, Prandtl)
- Applications (écoulement dans un tube, sur une plaque plane)

### III-3. Convection naturelle

- Nombre de Grashof et Rayleigh
- Corrélations pour différentes géométries

## Chapitre IV : Rayonnement Thermique

### IV-1. Principes fondamentaux

- Lois du rayonnement (Stefan-Boltzmann, Planck, Wien)
- Propriétés des surfaces (émissivité, absorptivité, réflexivité)

### IV-2. Échanges radiatifs entre corps

- Facteurs de forme (angle de vue)
- Réseaux de résistances radiatives
- Applications (four industriel, isolation thermique)

## Chapitre V. Transferts Combinés (Conduction-Convection-Rayonnement)

- Problèmes multiphysiques (ex : échangeur de chaleur, panneau solaire)
- Approches numériques (introduction aux logiciels : COMSOL, ANSYS Fluent)
  - *Heat Transfer* – J.P. Holman
  - *Principles of Heat and Mass Transfer* – Incropera & DeWitt
- Logiciels : COMSOL, ANSYS, MATLAB (outils de modélisation)

### Mode d'évaluation:

Contrôle continu: 0 Examen: 100%.

### Références bibliographiques :

- Introduction aux transferts d'énergie : Cours et exercices d'application Auteur(s) : Jean Taine, Franc Enguehard, Estelle Iacona, Editeur(s) : Dunod Collection : Sciences sup
- Introduction aux transferts thermiques ; Cours et exercices corrigés
- Auteur(s) : Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali
- Editeur(s) : Dunod, Collection : Sciences sup
- Transfert de chaleur , Auteur(s) : André Giovannini, Benoît Bédaride
- Editeur(s) : Cépaduès
- Transferts thermiques - Introduction aux transferts d'énergie : Cours et exercices d'application - L3, Master, écoles d'ingénieurs, Auteur(s) : Jean Taine, Estelle Iacona, Jean-Pierre Petit
- Editeur(s) : Dunod , Collection : Sciences sup
- *Heat Transfer* (J.P. Holman)
- *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Incropera & DeWitt)

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UED 1**

**Matière 1 : Chimie des plasmas**

**VHS : 22h30 (Cours: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement:**

Ce module traite des propriétés physiques et chimiques des plasmas froids hors d'équilibre, A cause de leur réactivité, ces plasmas trouvent multiples applications notamment celles qui sont liées à l'environnement

### **Connaissances préalables recommandées**

Thermodynamique – Décharges électrique dans les gaz - Cinétique chimique – physique atomique – physique statistique

### **Contenu de la matière**

#### **Chapitre I: Introduction générale (2 semaines)**

- I-1. Qu'est-ce qu'un plasma ? (définition physique et chimique)
- I-2. Plasmas naturels et artificiels
- I-3. Pourquoi la chimie des plasmas ? Domaines concernés
- I-4. Présentation des grands types de réacteurs plasma

#### **Chapitre II: Espèces et réactivité dans un plasma (2 semaines)**

- II-1. Nature des espèces actives : électrons, ions, radicaux, neutres excités
- II-2. Propriétés physico-chimiques des espèces
- II-3. Classification des réactions : neutres, chargées, excitées
- II-4. Chaînes de réactions chimiques et schémas réactionnels

#### **Chapitre III: Sources d'énergie et distribution d'énergie (2 semaines)**

- III-1. Décharges électriques : DC, RF, micro-ondes, DBD
- III-2. Apports d'énergie : électrons vs gaz
- III-3. Distribution d'énergie électronique (EEDF)
- III-4. Notion de non-équilibre thermodynamique

#### **Chapitre IV: Réactions clés dans les plasmas chimiques (2 semaines)**

- IV-1. Ionisation (simple, double, Penning...)
- IV-2. Dissociation collisionnelle
- IV-3. Recombinaisons (radiative, trois corps)
- IV-4. Attachement/détachement électronique
- IV-5. Réactions de transfert de charge
- IV-6. Réactions avec les parois

#### **Chapitre V: Cinétique chimique en milieu plasma (2 semaines)**

- V-1. Modèle à vitesses finies
- V-2. Temps caractéristiques des réactions
- V-3. Ordre de grandeur des constantes de réaction
- V-4. Couplage chimie / transport / énergie

#### **Chapitre VI: Interactions plasma-matière (2 semaines)**

- VI-1. Phénomènes de surface : adsorption, sputtering, dépôt, gravure
- VI-2. Rôle des radicaux et des ions dans les réactions de surface
- VI-3. Activation chimique par le plasma
- VI-4. Cas des matériaux polymères, métalliques, semi-conducteurs

### **Chapitre VII: Applications chimiques des plasmas (3 semaines)**

- VII-1. Synthèse de matériaux (nano, films minces, composites)
- VII-2. Traitement de surfaces (hydrophilie, activation, stérilisation)
- VII-3. Dépollution de l'air et traitement des effluents
- VII-4. Conversion de gaz ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , etc.)
- VII-5. Chimie verte et durabilité
- VII-6. Destruction de COV (composés organiques volatils).
- VII-7. Cicatrisation, stérilisation (plasmas froids).

#### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: Examen: 100%.

#### **Références bibliographiques :**

- 1-Plasmas Réactifs Ricard A 1996
- 3- Théories et applications de la physique des plasmas à basses températures Nowacki P.J 1965
- Low Temperature Plasma Physics: fundamental aspects and applications Hippler, R. (ed) 2001
- Electrical probes for plasma diagnostics Swift S.D., Schwar M.J. 1970
- Metallurgy thermochemistry ( vol 1) Kubaschewski O., Evans E. 1965
- Reactive plasmas Ricard A 1995
- Non-equilibrium thermodynamics Groot, de S.R. 1962
- Plasma froid : Réactivité en surface et en volume Publication de l'universite de Saint Etienne 2005
- M. Capitelli, C. Gorse, A. B. Taran – *Plasma Kinetics in Atmospheric Gases* (Springer, 2000)
- *Plasma Chemistry*" (Alexander Fridman).
- *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*" (Lieberman).

**Semestre: S1**

**Unité d'enseignement: UED 1**

**Matière 2 : Plasma pour l'environnement**

**VHS: 22h30 (Cours: 1h30)**

**Crédits: 1**

**Objectifs de l'enseignement:**

- Apprendre à utiliser les plasmas froids pour résoudre des problèmes environnementaux (air, eau, déchets).
- Maîtriser les principes physiques, chimiques et techniques des traitements plasma.

**Connaissances préalables recommandées:**

Thermodynamique – Décharges électrique dans les gaz - Cinétique chimique – physique atomique

**Contenu de la matière:**

**1. Introduction (2 semaines)**

- Qu'est-ce qu'un plasma « pour l'environnement » ?
- Rôle des plasmas hors équilibre dans la dégradation de polluants
- Avantages des plasmas non thermiques : activation chimique sans chauffage global

**2. Rappels sur les plasmas froids (2 semaines)**

- Nature des espèces actives : électrons, ions, radicaux, UV
- Types de décharges utilisées : décharge à barrière diélectrique (DBD), jets plasma, micro-décharges
- Caractéristiques physiques : température électronique, densité de particules

**3. Plasmas pour la dépollution de l'air (3 semaines)**

- Traitement des COV (composés organiques volatils)
- Traitement des NOx et SOx (polluants atmosphériques)
- Réactions chimiques plasma-assistées (oxydation, réduction)

**4. Plasmas pour le traitement de l'eau (3 semaines)**

- Dégradation de polluants organiques et inorganiques
- Production d'espèces réactives oxygénées et azotées (ROS, RNS)
- Technologies : décharges plasma dans ou au-dessus de l'eau

**5. Plasmas pour le traitement des déchets solides (3 semaines)**

- Destruction des Déchets par Plasma
- Gazéification assistée par plasma pour la valorisation énergétique
- Pyrolyse plasma

**6. Génie des procédés plasmas environnementaux (2 semaines)**

- Conception de réacteurs plasma pour traitement d'effluents
- Optimisation énergétique et rendement des procédés
- Couplage plasma-catalyse (plasma catalytique)

**Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

### **Références bibliographiques :**

1. Fridman, Alexander – "Plasma Chemistry" Éditeur : Cambridge University Press, 2008
2. Fridman, Alexander & Kennedy, L.S. – "Plasma Physics and Engineering" Éditeur : CRC Press, 2<sup>e</sup> édition, 2014
3. Roth, J. Reece – "Industrial Plasma Engineering: Volume 2 Applications to Nonthermal Plasma Processing" Éditeur : CRC Press, 2001
4. Tendero, Cindy et al. – "Atmospheric Pressure Plasmas: A Review" Journal : Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2006

**Semestre: 1**

**Unité d'enseignement: UET 1**

**Matière 1 : Exploration de Logiciels libres et open source de la spécialité**

**VHS : 45h (Cours: 1h30)**

**Semestre 1**

**Intitulé de l'unité : Transversale**

**Intitulé de la matière : Exploration de logiciels libres et open source en Physique des Plasmas**

**Objectifs de l'enseignement :**

- Initier les étudiants à l'utilisation de logiciels libres et open source pour la simulation, la modélisation et l'analyse des phénomènes plasma.
- Comprendre les approches numériques (fluides et cinétiques) dans l'étude des plasmas.
- Développer des compétences pratiques dans l'utilisation de codes de simulation (PIC, MHD, FDTD), la visualisation des résultats et l'analyse de données.

**Connaissances préalables recommandées :**

- Notions fondamentales en physique des plasmas : quasi-neutralité, débye, collisions, ondes
- Bases en électromagnétisme, analyse numérique et programmation (Python, Fortran ou C++)
- Connaissance de l'environnement Linux souhaitable

**Programme pédagogique:**

### **Chapitre I. Introduction aux outils open source pour plasmas**

- Philosophie open source et gestion communautaire
- Aperçu des logiciels majeurs : XOOPIC, FDTD++, BOUT++, PLASIMO, EPOCH, SMILEI
- Préparation de l'environnement de travail : compilation, installation, gestion de dépendances

### **Chapitre II. Simulation fluide des plasmas**

- Notions de base de la MHD (magnetohydrodynamique)
- Logiciels : BOUT++, PLASIMO
- Équations résolues, conditions aux limites, instabilités (Rayleigh-Taylor, interchange)
- Analyse des résultats, extraction de profils de densité, température, vitesses

### **Chapitre III. Simulation cinétique par la méthode PIC (Particle-In-Cell)**

- Principe de la méthode PIC
- Utilisation de XOOPIC, EPOCH, SMILEI
- Configuration de géométries 1D/2D, injection de particules, diagnostics (densité, courant, champs)
- Simulation de plasma froid et chaud, interactions onde-particule

### **Chapitre IV. Propagation d'ondes électromagnétiques dans un plasma**

- Introduction aux méthodes FDTD (Finite-Difference Time-Domain)
- Utilisation de FDTD++ pour simuler l'interaction onde-plasma
- Exemples : réflexion, absorption, résonance

## **Chapitre V. Visualisation et analyse**

- Utilisation de Python (Matplotlib, NumPy, h5py) pour extraire et représenter les données
- Outils de visualisation 2D/3D : VisIt, ParaView
- Traitement des fichiers de sortie HDF5, VTK, CSV

## **Chapitre VI. Applications thématiques**

- Simulation d'un confinement magnétique (Tokamak simplifié)
- Interaction laser-plasma à haute intensité (utilisation de EPOCH ou SMILEI)
- Etude de sources de plasma atmosphériques ou de décharges micro-ondes

## **Chapitre VII. Mini-projet**

- Projet individuel ou par binôme sur un scénario de simulation d'intérêt
- Rapport scientifique et présentation orale

## **Références recommandées :**

1. Birdsall, C. K., & Langdon, A. B. "Plasma Physics via Computer Simulation", Taylor & Francis, 2004.
2. Hockney, R. W., & Eastwood, J. W. "Computer Simulation Using Particles", CRC Press, 1988.
3. Documentation de XOOPIC : <http://hpgcc.gsfc.nasa.gov/xoopic/>
4. EPOCH PIC code : <https://cfsa-pmw.warwick.ac.uk/EPOCH>
5. SMILEI : <https://smileipic.github.io/Smilei/>
6. PLASIMO : <https://plasimo.phys.tue.nl/>
7. ParaView/VisIt : <https://www.paraview.org>, <https://wci.llnl.gov/simulation/computer-codes/visit>

## **Programme détaillé par matière du semestre S2**

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UEF 2**

**Matière 1: Eléments de physique statistique hors équilibre**

**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement:**

Grâce aux lois de la physique statistique et notamment celles qui régissent l'évolution d'un système on arrive à établir l'équation de Boltzmann et déduire les équations de conservations

**Connaissances préalables recommandées:**

Mécanique classique - physique statistique

**Contenu de la matière:**

**Chapitre I : Théorie cinétique des gaz (3 semaines)**

- I-1 Introduction
- I-2 Hypothèses de la théorie cinétique
- I-3 Vitesse quadratique moyenne – Vitesse moyenne
- I-4 Définition cinétique de la température
- I-5 Pression cinétique d'un gaz
- I-5 Equation d'état d'un gaz parfait
- I-6 Loi de distribution des vitesses de Maxwell
- I-7 Phénomènes de transport à travers les gaz
  - I-7-1 Section efficace de collision.
  - I-7-2 Libre parcours moyen- Temps libre moyen
  - I-7-3 Viscosité d'un fluide

**Chapitre II : Evolution d'un système hors d'équilibre (3 semaines)**

- II-1 Introduction
- II-2 Description classique d'un système
- II-3 Approximation du champ moyen
- II-4 Théorème de Liouville
- II-5 Fonction de distribution à une seule particule
- II-6 Fonction de distribution et moyennes locales
- II-7 Equation de Boltzmann sans collisions
- II-8 Interprétation de l'équation de Boltzmann
- II-9 Grandeurs Moyennes

**Chapitre III : Equations cinétiques (3 semaines)**

- III.1 Introduction
- III.2 Equation de Liouville
- III.3 Fonction de distribution et densité simples
- III.4 Fonction de distribution et densité doubles
- III.4 Fonctions de distribution et densités multiples
- III.5 Système d'équations de BBGKY
  - III.5.1 Equation d'évolution de la fonction  $f_1$
  - III.5.2 Equation d'évolution de la fonction  $f_{12}$
- III.6 Système d'équations de BBGKY- Méthodes de fermeture
  - III.6.1 Equation de Liouville à une particule
  - III-6-2 Equation de Vlasov

III.7 Etablissement des équations de transport  
III.7.1 Définitions des grandeurs hydrodynamiques  
III.7.2 Equations de transport

#### **Chapitre IV : Evaluation du terme de collisions (3 semaines)**

IV.1 Introduction  
IV.2 Hypothèses  
IV.3 section efficace de collisions  
IV.4 Propriétés des sections efficaces III.5 Détermination du terme de collisions  
IV.5.1 Terme de perte  $I^{(-)}$   
IV.5.2 Terme de gain  $I^{(+)}$   
IV.5.3 Terme total de collisions  
IV.6 Distribution d'équilibre

#### **Chapitre V : De l'équation de Boltzmann aux équations hydrodynamiques (3 semaines)**

V-1 Introduction  
V-2 Régime hydrodynamique  
V-3 Equations de bilan locales  
V-4 Etablissement des Equations de conservation  
V-4-1 Equation de conservation de masse  
V-4-2 Equation de conservation de quantité de mouvement  
V-4-3 Equation de conservation de l'énergie interne

#### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

#### **Références bibliographiques :**

- 1- [Physique des plasmas froids](#) Held B. 1994
- 2- Basic processes of gaseous electronics Loeb L.B 1955
- 3- Statistical mechanics of charged particles Balescu R. 1963
- 4- Kinetics of non equilibrium low temperature plasmas Biberman L.M., Vorob'ev V.S. 1987
- 5- Physical properties of glass Stanworth J.E 1950
- 6- [Fundamentals of statistical and thermal physics](#) Reif F 1960
- 7- Introduction à la théorie générale du transfert des particules: Kourganoff Y. 1967

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UEF 2**

**Matière 2: Ondes dans les plasmas et Magnétohydrodynamique**

**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement:**

L'objectif de ce cours est d'introduire aux étudiants les premières connaissances relatives à la magnétohydrodynamique. Cela constitue une suite logique au cours de dynamique des fluides appliqué aux plasmas.

### **Connaissances préalables recommandées:**

Analyse vectorielle, dynamique des fluides. Ondes électromagnétique – Phénomène de base dans les plasmas

### **Contenu de la matière:**

#### **Partie A**

##### **Chapitre I : Généralités sur les ondes (2 semaines)**

1. Introduction générale : Importance des ondes dans les plasmas
2. Equations de Maxwell
3. Caractéristiques des ondes EM
4. Vitesse de phase et vitesse de groupe
5. Polarisation de l'OEM
6. Energie électromagnétique : vecteur poynting
8. Equations de Maxwell dans un milieu diélectrique
9. Relations constitutives du milieu
10. Permittivité complexe : modes propagatifs et modes évanescents

##### **Chapitre II : Ondes dans un plasma froid homogène (3 semaines)**

1. Les équations fluides
2. Description diélectrique du plasma : courant de polarisation
3. Equations de propagation des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$
4. Equation du mouvement des particules
5. Plasma non magnétisé
  - 5.1 Mode longitudinal : ondes plasmas électroniques
  - 5.2 Mode transversal : ondes électromagnétiques
6. Plasma magnétisé
  - 6.1 Effet du champ sur le mouvement des particules
  - 6.2 Coupures et résonances
  - 6.3 Propagation parallèle ( $\vec{k} \parallel \vec{B}_0$ )
  - 6.4 Approche basse fréquence (Les whistlers)
  - 6.5 Propagation perpendiculaire ( $\vec{k} \perp \vec{B}_0$ )
  - 6.6 Approche très basse fréquence (onde d'Alfvén compressionnelle et onde d'Alfvén torsionnelle)

##### **Chapitre III : Ondes dans un plasma chaud homogène (3 semaines)**

1. Equations de base
2. Plasma non magnétisé
  - 2.1 Mode longitudinal : onde de Langmuir

- 2.2 Mode transversale : OEM
- 2.3 Onde acoustique ionique
- 3. Plasma magnétisé
  - 3.1 Ondes d'Alfven
  - 3.2 Ondes magnéto-sonores

## **Partie B**

### **Chapitre I: Introduction à la MHD (3 semaines)**

- II-1 Définitions
- II-2. Validité MHD pour les plasmas collisionnels
- II-3. Objet de la MHD - Applications de la MHD
- II-4. Le système des équations de la MHD – Convection et Diffusion
- II-5. Adimensionnement des équations de la MHD
- II-6. Domaine de validité des approximations MHD dans le plan ( $R_e$ - $R_m$ )
- II-7. Linéarisation des équations de la MHD (Equation d'onde d'Alfven ; vitesse de l'onde d'Alfven ; Nombre de Lundquist)
- II-8. Cas d'un écoulement incompressible

### **Chapitre II : Aspects énergétiques (2 semaines)**

- III-1 Puissance électromagnétique (énergie magnétique, énergie cinétique)
- III-2 Le théorème d'Alfven
- III-3 Interprétation du théorème d'Alfven
- III-4 Cas d'un fluide infiniment conducteur (1<sup>er</sup> Cas limite de convection de champ magnétique)
- III-5 Diffusion du champ magnétique à travers un fluide (2<sup>ème</sup> cas limite)
- III-6 Le nombre de Mach Alfvénique
- III-7 Ondes MHD d'Alfven
- III-7 Ondes Magnéto-sonores

### **Chapitre III : Différentes Modélisation de la MHD (2 semaines)**

- IV-1 La MHD idéale (Equations de la MHD Idéale)
- IV-2 La MHD Résistive (Le nombre de Hartmann)
- IV-3 Applications de la MHD idéale (Le confinement (ex : ITER : Tokamak) et la reconnexion magnétique : Modèle de nappe de courant ; Modèle de Sweet-Parker)
- IV-4 MHD des liquides

#### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

#### **Références bibliographiques :**

- Ondes dans les plasmas : Physique spatiale Quemada D 1968
- Electromagnetic fluctuations in plasma Sitenko A.G. 1967
- La théorie des ondes dans les plasmas Denisse J.F., Delcroix J.L. 1961
- La découverte des ondes de matière: proceedings Académie des Sciences 1994
- Magnétohydrodynamique : Des plasmas de laboratoire à l'astrophysique - Cours et exercices corrigés [Sébastien Galtier](#)
- Magnetohydrodynamics of laboratory and astrophysical plasmas (2019), J. P. Hans Goedbloed, Rony Keppens, Stefaan Poedts, Cambridge ; New York : Cambridge university press
- Magnétohydrodynamique de [Roland Berton](#) chez [Elsevier Masson](#)

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UEF 2**

**Matière 1: Physique atomique II.**

**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement:**

L'étudiant aurait appris les notions basiques des processus atomiques dans les plasmas chauds présents dans l'univers ou produits en laboratoire. Ces processus concernent les collisions entre les électrons et les atomes fortement ionisés et les émissions radiatives qui en résultent.

### **Connaissances préalables recommandées:**

Mécanique Quantique II, Physique Atomique et Physique Atomique I (enseignés en L3 Physique, semestres 5 et 6, et M1 Physique des Plasmas, semestre 1, respectivement).

### **Contenu de la matière:**

#### **Chapitre I– Processus atomiques élémentaires dans les plasmas chauds (6 semaines)**

- I- Les différents processus atomiques
- II- Transitions optiquement permises et transitions interdites. Probabilités de transition
- III- Sections efficaces de collisions électron-ion. Coefficients de taux de collision
- IV- Cinétique des populations des niveaux atomiques dans un plasma chaud. Modèles ETL, collisionnel-radiatif, et Modèle coronal
- V- Excitation des ions par impact d'électrons
  - 1) Coefficient de taux d'excitation
  - 2) Excitation résonnante
- VI- Ionisation des ions par impact d'électrons
  - 1) Processus indirects d'ionisation
  - 2) Contribution de l'excitation-autoionisation
  - 3) Contribution de RRDA (resonant recombination double autoionization)
- VII- Recombinaison diélectronique et radiative
  - 1) Coefficient de taux de recombinaison diélectronique
  - 2) Coefficient de taux de recombinaison radiative
- VIII- Equilibre d'ionisation coronal

#### **Chapitre II– Diagnostics en densité d'électrons d'un plasma chaud (3 semaines)**

- I- Introduction
  - 1) Diagnostic spectroscopique d'un plasma
  - 2) Plasmas optiquement mince et optiquement épais
- II- Différentes méthodes spectroscopiques de diagnostic
  - 1) Intensités relatives de raies d'émission
  - 2) Profils de raies
  - 3) Etat de polarisation des raies
  - 4) Rayonnement continu

### III- Diagnostic en densité d'électrons

- 1) Principe du diagnostic
- 2) Les trois types de couples de raies
- 3) Exemples

## **Chapitre III– Diagnostics en température électronique des plasmas chauds (3 semaines)**

### I- Introduction

### II- Diagnostic basé sur deux raies d'émission d'un même ion

- 1) Principe du diagnostic
- 2) Application aux ions lithumoides multichargés

### III- Diagnostic basé sur des raies satellites de recombinaison diélectronique

- 1) Principe du diagnostic
- 2) Rapport de l'émissivité des raies satellite diélectronique et de résonance parente
- 3) Application aux raies  $j$  et  $w$  des ions de fer Fe XXIV et Fe XXV

## **Chapitre IV– Diagnostics des distributions non-Maxwelliennes d'électrons (3 semaines)**

### I- Existence d'électrons non-thermiques dans des plasmas chauds

### II- Distributions d'énergie non-Maxwelliennes : bi-Maxwellienne, power law, Gaussienne

### III- Diagnostics de distribution des électrons non-thermiques isotropes

- 1) Principe de base
- 2) Emissivités des raies satellite diélectronique et de résonance. Application

### IV- Diagnostics de distribution des électrons non-thermiques anisotropes

- 1) Polarisation et distribution angulaire d'émissivité de raies
- 2) Application

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

### **Références bibliographiques :**

- *Excitation of Atoms and Broadening of Spectral Lines*, Sobelman I.I., Vainshtein L.A., Yukov E.A. (Springer 1995).
- *Atomic Spectra and Radiative Transitions*, Sobelman I.I. (Springer-Verlag 1992).
- *The Theory of Atomic Structure and Spectra*, Cowan R.D. (University of California Press 1981).
- *Physics of atoms and molecules*, Bransden B.H., Joachain C.J. (Prentice Hall 2003).
- *Introduction to Plasma Spectroscopy*, Kunze H.-J. (Springer 2009).
- *Atomic Physics for Hot Plasmas*, Shevelko V.P., Vainshtein L.A. (IOP Publishing 1993).
- *Introduction to the Physics of Highly Charged Ions*, Beyer H.F., Shevelko V.P. (IOP Publishing 2003).

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UEM 2**

**Matière 1 : Numerical Analysis I**

**VHS: 45h (Cours: 1h30, TP: 1h30)**

### **Course Objectives:**

This course introduces students to standard numerical methods for solving physics problems. Practical sessions are dedicated to implementing the algorithms studied in the course using programming languages such as Fortran or Python. If students use the Python language, they will be required to work with the numpy, scipy, and matplotlib libraries.

### **Recommended Prerequisites:**

Analysis (differential and integral calculus) – Linear algebra (matrix computation).

### **Course Content:**

#### **Chapter 1: Systems of Linear Equations – Solving $Ax = B$ (3 week)**

1. Direct Methods:
  - 1.1 Matrix triangulation
  - 1.2 Matrix inversion: Doolittle algorithm
  - 1.3 Crout (LU) and Cholesky decompositions
2. Iterative Methods:
  - 2.1 Convergence analysis
  - 2.2 Jacobi and Gauss-Seidel methods
  - 2.3 Successive Over-Relaxation (SOR) method

#### **Chapter 2: Eigenvalues and Eigenvectors – Solving $Ax = \lambda x$ (3 week)**

1. Characteristic polynomial calculation
2. Power iteration
3. QR decomposition via Householder orthogonalization

#### **Chapter 3: Root Finding – Solving $F(x) = 0$ (3 week)**

1. Graphical method: Descartes' method
2. Lagrange, Newton-Raphson, Bisection and fixed-point methods

#### **Chapter 4: Numerical Evaluation of a definite integral (3 week)**

1. Rectangle and Trapezoidal methods
2. Simpson and Newton-Cotes quadrature methods

#### **Chapter 5: Numerical Solutions of Ordinary Differential Equations (ODEs) (3 week)**

1. One-Step Methods:
  - 1.1. Explicit and Implicit Euler algorithm
  - 1.2. Runge-Kutta methods
2. Multi-Step Methods: Adams-Bashforth schemes

### **Evaluation Method:**

Knowledge evaluation will consist of a written exam (50%), practical works (50%).

### **References :**

- [1] Introduction aux méthodes numériques, Franck Jedrzejewski, 2nd Edition, Springer, 2005
- [2] Méthodes numériques – Eléments d'un premier parcours, Jean-Marc Huré & Didier Pelat, 2022.
- [3] Méthodes numériques – Eléments d'un premier parcours, Jean-Marc Huré & Didier Pelat, 2022.  
<https://media4.obsprm.fr/public/M2R/supports/CoursMN.pdf>

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UEM 2**

**Matière 2 : Intelligence artificielle et Machine Learning 2**

**VHS: 15h (TP: 1h00)**

### **Objectifs du cours :**

S'appuyer sur les techniques de base de l'apprentissage automatique (Machine Learning) pour introduire l'apprentissage profond, les réseaux neuronaux et les concepts avancés d'apprentissage automatique pour les applications en sciences de la matière. Les étudiants approfondiront leur compréhension de la découverte et de la conception de matériaux basées sur l'IA.

### **Contenu du cours :**

- **Chapitre 1 : Modèles basés sur les graphes dans les sciences de la matière**  
Les matériaux sont des graphes : atomes = nœuds, liaisons = arêtes.  
Réseaux convolutionnels de graphes de cristaux (CGCNN).  
Étude de cas : Prédiction des énergies de formation.
- **Chapitre 2 : Modèles génératifs pour la conception de matériaux**  
Introduction aux réseaux adversariels génératifs (GAN) et aux auto-encodeurs variationnels (VAE).  
Application : Conception de nouveaux matériaux et molécules.
- **Chapitre 3 : Évaluation des modèles et interprétabilité**  
Techniques d'évaluation des modèles d'apprentissage profond : validation croisée, surajustement.  
Interprétation des modèles avec SHAP et LIME.
- **Chapitre 4 : Techniques avancées de ML**  
Modèles d'ensemble (Random Forests, XGBoost, LightGBM).  
Modèles avancés de régression et de classification.  
Réduction de la dimensionnalité : ACP, t-SNE, UMAP.
- **Chapitre 5 : Applications avancées en sciences de la matière**  
Conception inverse pour la découverte de matériaux à l'aide de l'IA.  
Prédiction des propriétés des matériaux (modules élastiques, supraconductivité, etc.).  
Modélisation multi-échelle : combinaison de l'IA avec la dynamique moléculaire ou la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT).
- **Chapitre 6 : Mini-Projet de spécialisation (Capstone Project)**  
Les étudiants réaliseront un projet dans lequel ils appliqueront l'IA/ML pour résoudre un problème en sciences de la matière, en utilisant les compétences acquises tout au long du semestre.

### **Outils et bibliothèques :**

- Python, Jupyter Notebooks
- TensorFlow, PyTorch
- Matminer, Pymatgen

### **Bibliographie :**

- *"Deep Learning" by Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville (a comprehensive introduction to deep learning)*
- *"Deep Learning with Python" by François Chollet (applies Keras for hands-on deep learning projects)*
- *"Machine Learning for Materials Science" by Jha et al. (directly relates to AI in materials science)*
- *"Data Science for Materials Discovery" by K. A. Persson, et al. (focused on machine learning applications in materials science)*
- *"Materials Informatics: Methods, Tools, and Applications" by Rajiv S. Mishra (further extends ML into material discovery)*

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UEM 2**

**Matière 2 : Spectroscopie dans les plasmas**

**VHS: 45 h (Cours: 1h30, TP: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement**

- Comprendre les bases théoriques de la spectroscopie appliquée aux plasmas.
- Maîtriser les différentes méthodes spectroscopiques utilisées pour diagnostiquer un plasma.

### **Connaissances préalables recommandées .**

Physique atomique. Physique des rayonnements optique

### **Contenu de la matière**

#### **Chapitre I : Introduction générale (3 semaines)**

- Importance de la spectroscopie pour l'étude des plasmas
- Différences entre spectroscopie dans les gaz neutres et dans les plasmas
- Types de plasmas : thermiques, non thermiques, haute densité, basse densité

#### **Chapitre II : Formation des raies spectrales dans un plasma (3 semaines)**

- Processus de production du rayonnement :
  - Excitation électronique
  - Ionisation et recombinaison
- Processus de perte d'énergie par rayonnement :
  - Bremsstrahlung (rayonnement de freinage)
  - Rayonnement de recombinaison
  - Rayonnement de transition

#### **Chapitre III : Bases physiques de la spectroscopie (3 semaines)**

- Atomes et ions : structure des niveaux d'énergie
- Transitions électroniques : émission, absorption, fluorescence
- Largeurs et déplacements des raies spectrales
  - Élément Doppler
  - Élément Stark
  - Élément Zeeman

#### **Chapitre III : Techniques spectroscopiques appliquées aux plasmas (3 semaines)**

- Spectroscopie d'émission optique (OES) : principe et mise en œuvre
- Spectroscopie d'absorption : mesure des populations d'états
- Spectroscopie résolue en temps : diagnostics dynamiques
- Spectroscopie à haute résolution : détection des effets fins (Stark, Zeeman)
- Spectroscopie de recombinaison : détection de l'équilibre dans les plasmas

#### **Chapitre IV: Diagnostics plasma par spectroscopie (3 semaines)**

- Détermination de la température électronique ( $T_e$ )
  - Méthode de la pente de Boltzmann
  - Rapport d'intensités de raies
- Détermination de la densité électronique ( $n_e$ )
  - Largeur Stark
  - Effet Zeeman

- Analyse de la composition chimique d'un plasma
- Cas particuliers : diagnostic de plasmas hors équilibre

### **Chapitre V : Applications pratiques (3 semaines)**

- Spectroscopie dans les plasmas industriels (dépôt de couches minces, gravure)
- Diagnostics de plasmas de fusion (tokamak, Z-pinch)
- Analyse LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)
- Études de plasmas astrophysiques (nébuleuses, atmosphères d'étoiles)

#### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 50 % ; Examen: 50%.

#### **Références bibliographiques :**

- "Introduction to Plasma Spectroscopy" par Hans A. Grady
- "Plasma Spectroscopy" par D.J. Donnelly
- "Plasma Spectroscopy: Ionization and Excitation" par Richard E. Hester
- "Spectroscopy of Plasmas and Gaseous Media" par S. A. Khrapak et al.
- "Plasma Diagnostic Techniques" édité par C. Chen
- "Plasma Spectroscopy in Fusion Research" par S. S. Medvedev
- "Diagnostic Techniques for Fusion Plasmas" par L. Chen et S. P. Hirshman
- "Astrophysical Plasmas: The Physics of Ionized Gases" par Stavros K. Vlahos
- "Spectroscopy of Plasmas in Astrophysical Systems" par R. D. L. G. McCray

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UED 2**

**Matière 1 : Les lasers et leurs applications**

**VHS: 22.5h (Cours: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement** (*Décrire ce que l'étudiant est censé avoir acquis comme compétences après le succès à cette matière – maximum 3 lignes*).

Dans cette partie sont enseignées les notions de base de la physique des lasers et leurs applications technologique et leurs relation avec la physique des plasmas

**Connaissances préalables recommandées** (*descriptif succinct des connaissances requises pour pouvoir suivre cet enseignement – Maximum 2 lignes*).

Mécanique quantique – Structure de la matière- Physique atomique

### **Contenu de la matière :**

#### **Chapitre I – Bases physiques du laser (2 semaines)**

##### **I-1. Nature de la lumière**

I-1-1. Propagation, polarisation, cohérence

I-1-2. Spectre électromagnétique et lumière monochromatique

##### **I-2. Interaction lumière-matière**

I-2-1. Absorption, émission spontanée, émission stimulée

I-2-2. Coefficients d'Einstein et bilan énergétique

##### **I-3. Amplification optique et inversion de population**

- Conditions pour obtenir un gain
- Moyens de pompage (optique, électrique)

#### **Chapitre II – Composants d'un laser (2 semaines)**

##### **1. Milieux amplificateurs**

- Gaz, solides, liquides, semiconducteurs
- Choix du milieu selon l'application

##### **2. Cavity optique**

- Résonateurs Fabry-Pérot, cavités en anneau
- Modes longitudinaux et transverses

##### **3. Émission laser**

- Seuil laser, efficacité, rendement
- Stabilité et régulation

#### **Chapitre III – Types de lasers (3 semaines)**

1. Lasers à gaz : He-Ne, CO<sub>2</sub>, excimères

2. Lasers à solide : rubis, Nd:YAG, Ti:saphir

3. Lasers à semiconducteurs (diodes laser)

4. Lasers à fibres

5. Lasers à colorant et lasers pulsés ultra-brefs (femtoseconde, picoseconde)

#### **Chapitre IV – Paramètres et caractéristiques techniques (2 semaines)**

1. Puissance moyenne et puissance de crête
2. Régimes de fonctionnement : continu vs pulsé
3. Largeur spectrale, stabilité en fréquence
4. Q-switching et mode-locking
5. Guidage, focalisation et manipulation du faisceau

#### **Chapitre V – Applications scientifiques et technologiques (3 semaines)**

1. Industrie : découpe, soudage, micro-usinage, impression 3D
2. Médecine : chirurgie laser, dermatologie, ophtalmologie
3. Télécommunications : fibres optiques, modulation optique
4. Métrologie : interférométrie, spectroscopie, horloges optiques
5. Recherche fondamentale : spectroscopie ultra-rapide, manipulation d'atomes, pinces optiques

#### **Chapitre VI– Applications en sciences de la matière et de l'environnement (3 semaines)**

1. Détection à distance : LIDAR, télémétrie
2. Analyse chimique : spectroscopie LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy)
3. Traitement de surface et modification de matériaux
4. Lasers et plasmas : génération et diagnostics

#### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: Examen: 100%.

#### **Références bibliographiques :**

- Les lasers [Daniel Hennequin](#), [Véronique Zehnlé](#), [Didier Dangoisse](#)
- Collection: [Sciences Sup](#), [Dunod](#) 2013
- Le laser et ses applications 50 ans après son invention
- Auteur(s) : [Pascal Besnard](#), [Pierre-Noël Favennec](#)
- Editeur(s) : [Hermès - Lavoisier](#) Collection : [Télécom](#) 18/11/2010
- Le laser De [Fabien Bretenaker](#) et [Nicolas Treps](#)
- [EDP Sciences](#) - Collection : [Une Introduction à ...](#) - avril 2010
- Physique quantique, atomes, laser de Fabien Bretenaker et Nicolas Treps, Eds. Belin, Collection
- Les lasers (3<sup>e</sup> Éd.) : Cours et exercices corrigés  
(Coll. Sciences Sup) Auteurs : HENNEQUIN Daniel, DANGOISSE Didier

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UED 2**

**Matière 2 : Procédés plasma et nouvelles applications**

**VHS: 22.5h (Cours: 1h30)**

Objectifs de l'enseignement

- Comprendre les principes physiques et chimiques des procédés plasma.
- Identifier les différentes sources de plasma utilisées en industrie et recherche.
- Explorer les applications modernes des plasmas dans des domaines émergents (santé, énergie, environnement, matériaux).
- 

Connaissances préalables recommandées

Décharges électriques – Phénomène de base dans les plasmas- chimie des plasmas

Contenu de la matière (*indiquer obligatoirement le contenu détaillé du programme en présentiel et du travail personnel*)

### **Chapitre I : Introduction générale aux plasmas (2 semaines)**

- I-1. Définition du plasma et critères d'ionisation
- I-2. Classification des plasmas : thermiques, froids, non thermiques
- I-3. Paramètres fondamentaux : température, densité électronique, potentiel plasma
- I-4. Génération des plasmas : décharges, ondes RF, micro-ondes, lasers

### **Chapitre II : Physique des procédés plasma (3 semaines)**

- II-1. Interaction plasma-surface
- II-2. Transport de masse et d'énergie
- II-3. Chimie de plasma : espèces actives, réactions en phase gazeuse et de surface
- II-4. Équilibres thermodynamique et cinétique

### **Chapitre III : Technologies de génération des plasmas pour procédés (3 semaines)**

- III-1. Décharges à barrière diélectrique (DBD)
- III-2. Décharges couronne et jets plasma
- III-3. Plasmas RF et micro-ondes
- III-4. Arc thermique et plasma inductif (ICP)
- III-5. Plasmas pulsés (nanoseconde, femtoseconde)

### **Chapitre IV : Applications classiques des procédés plasma (4 semaines)**

- IV-1. Dépôt de couches minces (CVD, PECVD)
- IV-2. Gravure plasma (etching)
- IV-3 Nitruration et oxydation de surface
- IV-4. Traitement de surface (activation, texturation, nettoyage)
- IV-5. Synthèse de nanoparticules et nanostructures

## **Chapitre V : Nouvelles applications émergentes (3 semaines)**

### **V-1. Médecine et biologie :**

- Traitement de plaies, stérilisation, bio-impression, plasma jet

### **V-2. Environnement :**

- Traitement des gaz industriels, réduction de NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>, purification d'eau

### **V-3. Énergie :**

- Catalyse plasma, production d'hydrogène, batteries plasma

### **V-4. Aérospatial et propulsion :**

- Propulseurs ioniques, désorbitation satellite

### **V-5. Chimie verte :**

- Activation catalytique, transformation de CO<sub>2</sub>, valorisation de déchets

### **Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

### **Références bibliographiques :**

- 1- Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2nd ed., Wiley, 2005.
- 2- Fridman, A, *Plasma Chemistry*, Cambridge University Press, 2008.
- 3- Chen, F. F., *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, 3rd ed., Springer, 2016
- 4- Roth, J. R., *Industrial Plasma Engineering*, Vol. 1 & 2, Institute of Physics, 1995 & 2001.

**Semestre: S2**

**Unité d'enseignement: UED 2**

**Matière 3 : Introduction à la fusion inertielle**

**VHS: 22h30 (Cours: 1h30)**

**Crédits: 1**

**Objectifs de l'enseignement:**

- Découvrir le concept spécifique de fusion par confinement inertiel (Inertial Confinement Fusion, ICF).
- Étudier les méthodes de compression et d'ignition des cibles de fusion.

**Connaissances préalables recommandées:**

Physique nucléaire de base, Bases en physique des plasmas, électromagnétisme

**Contenu de la matière:**

**1. Introduction à la fusion nucléaire (2 semaines)**

- Réactions de fusion (D-D, D-T, D-<sup>3</sup>He)
- Conditions de Lawson : température, densité, temps de confinement
- Énergie libérée par fusion et comparaison avec la fission

**2. Principes de la fusion inertielle (2 semaines)**

- Définition du confinement inertiel
- Compression rapide et inertielle : principe de fonctionnement
- Notion d'ignition et de gain énergétique

**3. Cibles de fusion inertielle (2 semaines)**

- Conception des capsules (coquilles multicouches, cryogénie)
- Combustible utilisé (deutérium-tritium principalement)
- Fabrication et qualité des cibles

**4. Techniques de compression (2 semaines)**

- Chauffage direct par lasers puissants
- Chauffage indirect via rayonnement X (cavité hohlraum)
- Compression magnétisée (Magnetized Target Fusion – MTF)

## **5. Grands dispositifs expérimentaux (2 semaines)**

- National Ignition Facility (NIF, USA)
- Laser Mégajoule (LMJ, France)
- OMEGA (Rochester, USA)
- Comparaison des approches expérimentales

## **7. Applications et enjeux futurs (3 semaines)**

- Fusion inertielle pour l'énergie civile
- Fusion inertielle militaire (armes thermonucléaires)
- Projets d'énergie propre (ex : Laser Fusion Energy - LFE)
- Défis : rendement, coûts, sûreté, durée de vie des lasers

### **Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

### **Références bibliographiques :**

1. Atzeni, Stefano & Meyer-ter-Vehn, Jürgen – "The Physics of Inertial Fusion: BeamPlasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter" Éditeur : Oxford Science Publications, 2004.
2. Lindl, John D. – "Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive" Éditeur : Springer-Verlag, 1998.
3. Bodner, Stephen E. – "Inertial Fusion Sciences and Applications" (conférences ISFA)  
Collection de chapitres et articles issus des principales conférences internationales sur la fusion inertielle.
4. Gauthier, Jean-Claude – "Laser-Plasma Interaction and Applications" Éditeur : EDP Sciences, 2010.

**Semestre: 2**

**Unité d'enseignement: UET 2**

**Matière 1 : Applications métallurgiques des plasmas**

**VHS: 22.5h (Cours: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement:**

- Comprendre le rôle des plasmas dans les procédés métallurgiques modernes.
- Analyser les mécanismes physiques et chimiques impliqués dans l'interaction plasma-métal.

**Connaissances préalables recommandées:**

Phénomènes de base dans les plasmas, Techniques métallurgiques, physique générale

**Contenu de la matière:**

**1. 1. Fondamentaux des plasmas pour la métallurgie (2 semaines)**

- Classification des plasmas (thermique vs non thermique)
- Paramètres essentiels : température, densité, énergie spécifique
- Interaction plasma-matière : échanges thermiques, chimiques, mécaniques

**2. Génération et dispositifs plasma en métallurgie (2 semaines)**

- Torches plasma : arc transféré, arc non transféré
- Réacteurs et fours à plasma
- Paramètres de fonctionnement : gaz utilisés, puissance, pression

**3. Procédés de transformation des matériaux par plasma (2 semaines)**

- Fusion plasma
- Raffinage plasma de métaux précieux et critiques
- Plasma dans la métallurgie extractive : réduction des oxydes, traitement des scories

**4. Procédés de modification de surface par plasma (2 semaines)**

- Traitements thermochimiques plasma (nitruration, carbonitruration)
- Projection plasma (revêtements anti-corrosion, anti-usure)
- Texturation et nettoyage de surfaces métalliques

**5. Procédés de mise en forme par plasma (3 semaines)**

- Découpe plasma de matériaux métalliques
- Soudage plasma (PAW : Plasma Arc Welding)
- Impression et fabrication additive assistées par plasma

**6. Métallurgie des poudres et synthèse de matériaux avancés (2 semaines)**

- Atomisation plasma pour poudres métalliques
- Synthèse de céramiques, alliages et matériaux composites

**7. Cas pratiques et exemples industriels (2 semaines)**

- Applications dans l'aéronautique, l'automobile, l'électronique
- Recyclage plasma des métaux rares et stratégiques
- Plasma pour l'économie circulaire et la métallurgie durable

**Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

**Références bibliographiques :**

- "Plasma Processing of Materials: Science and Technology" – Edited by D.D. Voskoboinik & R. Kelly
- Éditeur : Wiley, 2007
- "Plasma Science and Technology: Applications in Materials and Semiconductor Processing" – R.J. Litchfield Éditeur : CRC Press, 2017
- "Plasma Chemistry" – D.J. O'Connell Éditeur : Cambridge University Press, 1988
- "Handbook of Thermal Plasma Processing" – A. K. Gupta, T. G. Mathur, and S. K. Gupta
- Éditeur : Springer, 2019
- "Plasma Arc Welding" – T. K. Kori, R. P. H. Chang Éditeur : Wiley, 2018
- "Plasma Spray Coating: A Practical Guide" – Z. R. Liu Éditeur : Woodhead Publishing, 2009

## **Programme détaillé par matière du semestre S3**

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UEF 3**

**Matière 1: Etude des plasma thermiques**

**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement:**

Ce module traite les propriétés thermodynamiques et les phénomènes de transport des plasmas en équilibre thermodynamique. Ces plasmas dits thermiques sont produits dans des torches ils réputés par leurs applications.

### **Connaissances préalables recommandées**

Phénomènes de base dans les plasmas – Thermodynamique- Décharge électriques  
physique des rayonnements

### **Contenu de la matière**

#### ***Chapitre I : Décharges électriques dans les gaz (2 semaines)***

*I-1. Introduction*

*I-2. Production d'un plasma*

*I-3. Application des plasmas froids*

*I-4. Décharges électriques dans les gaz*

*I-4-1. Décharge non autonome*

*I-4-2 Zone de collection avec multiplication*

*I-4-3. Décharge de Townsend*

*I-4-4. Décharge luminescente*

*I-4-5. Décharge d'arc*

*I-5. Courbes de Paschen*

*I-6 Les plasmas thermiques*

*I-7 Les Torches à plasma*

*I-8 Domaine d'application des torches à plasmas*

#### ***Chapitre II : Phénomènes Collisionnels dans les plasmas (2 semaines)***

*II-1 Introduction*

*II-2 Collision élastique*

*II-2 Collision inélastique*

Excitation Ionisation Attachement d'électron (formation d'ion négative) dissociation

#### ***Chapitre III : Généralités sur le rayonnement (2 semaines)***

*III-1. Introduction*

*III-3. Grandeurs caractéristiques du rayonnement*

*III-4. Émission et absorption*

*III-4-1. Emission spontanée*

*III-4-2. Emission induite ou stimulée*

*III-4-3. Absorption*

- III-4-5. Coefficient spectral d'émission
- III-4-6. Coefficient spectral d'absorption
- III-5. Lois du rayonnement thermique d'équilibre
- III-5-1. Rayonnement du corps noir - loi de Planck
- III-5-2. Loi de Wien
- III-5-3. Loi de Stefan-Boltzmann
- III-5-4. Loi de Kirchhoff
- III-6. Equation du transfert radiatif

## **Chapitre IV : Phénomènes responsable de l'émission de rayonnement dans les plasmas (2 semaines)**

- IV-1 Introduction
- IV-2 Le fond continu
  - IV-2 -1 La recombinaison radiative
  - IV-2 -2 Le rayonnement de freinage
  - IV-2 -3 L'attachement radiatif
- IV-3 Spectre de raies
  - IV-3-1 Elargissement de raies
    - Elargissement Doppler
    - Elargissement de pression
  - IV-3-2 Profil global d'une raie élargie

## **Chapitre V : Plasma en Equilibre thermodynamique (3 semaines)**

- V-1 Introduction
- V-2 Équilibre thermodynamique
  - V-2-1 Équilibre thermodynamique complet (ETC)
  - V-2-2 Les lois d'Equilibre
  - V-2-3 Ecart à l'équilibre thermodynamique
  - V-2-4 Equilibre thermodynamique local (ETL)
  - V-2-5 Critères d'existence de l'ETL
- V-3 Calcul de la composition d'un plasma en E T L
- V-5. Plasma à deux températures

## **Chapitre VI : Propriétés thermodynamiques d'un plasma (2 semaines)**

- VI-1. Introduction
- VI-2. Définition de la fonction de partition
- VI-3. Fonction de partition et les grandeurs thermodynamique
- VI-4. Les différentes fonctions de partition
  - VI-4-1. Fonction de partition de translation
  - VI-4-2. Fonction de partition interne
    - a- Cas des espèces monoatomiques
    - b- Cas des espèces diatomiques
    - c- Cas des espèces polyatomiques
  - VI-4-3. Fonction de réaction
- VI-5 Etude de l'équilibre chimique - Loi d'action de masse

## **Chapitre VII : Mécanismes de transfert d'énergie aux particules (2 semaines)**

VII-1 Introduction

VII-2 Les modes de transfert de chaleur

VII -3 Mécanisme de transfert d'énergie aux particules

Transfert d'énergie par collision élastiques

Transfert d'énergie par conduction thermique

Transfert d'énergie par rayonnement

Bilan d'énergie des électrons

VII -4 Equations de bases

VII -4-1 Equation de conservation de la masse

VII-4-3 La loi d'ohm

VII-5 Détermination du profil de température

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

### **Références bibliographiques :**

1-L'arc électrique et ses applications .Tome 1: étude physique de l'arc Club EDF : "Arc Electrique 1985

2-L'arc électrique et ses applications .Tome 2: applications Club EDF : "Arc Electrique 1985

3-Thermal plasmas : fundamental and applications ( tome 1) Boulos M., Fauchais P., Pfender E 1994

4-Thermal Plasmas For Hazardous Waste Treatment: proceedings Benocci R Bonizzoni G 1995

5-Turbulence: An introduction to its mechanisms and theory Hinze J.O. 1975

6-Vacuum arcs : theory and application Lafferty, J.M.(Ed) 1979

7-Handbook of vacuum arc science and technology Boxman, R.L. 1995

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UEF 3**

**Matière 1: Confinement magnétique des plasmas de fusion**

**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement**

Les principales propriétés des plasmas de fusion sont examinées dans cette matière ainsi que les conditions nécessaires pour leur confinement magnétique à partir de l'étude du mouvement de particules chargées non-interagissantes dans des champs électrique et magnétique.

### **Connaissances préalables recommandées**

Physique 2, Electromagnétisme, et Propriétés fondamentales des plasmas (enseignés en L1 SM, semestre 2, L2 Physique, semestre 4, et M1 Physique des Plasmas, semestre 1, respectivement).

### **Contenu de la matière**

#### **Chapitre I– Introduction à la fusion contrôlée (3 semaines)**

- I- Réactions de fusion
- II- Barrière Coulombienne
- III- Nécessité d'utilisation d'un plasma chaud
- IV- Température d'ignition
- V- Critère de Lawson
- VI- Les deux méthodes de confinement des plasmas de fusion

#### **Chapitre II– Mouvement d'une particule chargée dans des champs électromagnétiques constants et uniformes (2 semaines)**

- I- Introduction
- II- Conservation de l'énergie
- III- Champ électrostatique uniforme
- IV- Champ magnétostatique uniforme
- V- Champ magnétostatique et électrostatique uniformes
- VI- Dérive due à une force extérieure

#### **Chapitre III– Mouvement d'une particule chargée dans des champs magnétostatiques non uniformes (4 semaines)**

- I- Introduction
- II- Variation spatiale de champ magnétique
- III- Résolution approchée de l'équation de mouvement
- IV- Force moyennée sur une période de giration
- V- Dérive de gradient
- VI- Accélération parallèle du centreguide. Configuration de miroir magnétique
- VII- Dérive de courbure

## **Chapitre IV– Mouvement d’une particule chargée dans des champs électromagnétiques variables dans le temps (3 semaines)**

### **I- Champ électrique variable dans le temps**

- 1) Equation de mouvement et dérive de polarisation
- 2) Constante diélectrique du plasma
- 3) Champ électrique dépendant arbitrairement du temps
- 4) Phénomène de résonance cyclotron

### **II- Champ magnétique variable dans le temps**

- 1) Equation de mouvement et invariants adiabatiques
- 2) Compression magnétique

## **Chapitre V– Confinement magnétique des plasmas chauds dans les tokamaks (3 semaines)**

### **I- Configuration tokamak**

- 1) Champs magnétiques toroïdal et poloïdal
- 2) Trajectoire des particules chargées
- 3) Particules circulantes et particules piégées

### **II- Equilibre du plasma dans un tokamak**

#### **Mode d’évaluation:**

9- Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

10-

#### **Références bibliographiques :**

11-

- 1- *Introduction to Plasma Physics*, Chen F.F. (Plenum Press 1974).
- 2- *Introduction to Plasma Physics*, Goldston R.J., Rutherford P.H. (IOP Publishing 1995).
- 3- *Physique des Plasmas Collisionnels*, Moisan M., Pelletier J. (EDP Sciences 2006).
- 4- *The physics of Plasmas*, Boyd T.J.M., Sanderson J.J. (Cambridge University Press 2003).
- 5- *Tokamaks*, Wesson J. (Clarendon Press 1987).
- 6- *Fusion Energy*, Gross R.A. (John Wiley 1984).
- 7- *Fusion Plasma Analysis*, Stacey W.M. (Wiley-Interscience 1981).

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UEF 3**

**Matière 1: Etude des plasmas froids hors équilibre**

**VHS: 45h (Cours: 1h30, TD: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement**

- Comprendre les caractéristiques fondamentales des plasmas froids hors équilibre thermodynamique.
- Savoir modéliser et diagnostiquer un plasma froid (équations de base, méthodes de diagnostic).
- Apprécier la différence entre plasmas thermiques et non-thermiques, et entre équilibre local et global.

### **Connaissances préalables recommandées .**

Electromagnétisme, Décharge électrique, physique statistique hors équilibre, propriétés fondamentales des plasmas

### **Contenu de la matière**

#### **Chapitre I. Introduction aux plasmas froids (2 semaines)**

I-1. Définition et classification des plasmas

I-2. Plasmas thermiques et plasmas hors équilibre

I-3 Domaines d'application des plasmas froids

I-4. Paramètres caractéristiques : température électronique, densité électronique, etc.

#### **Chapitre II : Plasmas hors équilibre : propriétés spécifiques (3 semaines)**

II-1. Différence de température entre espèces (électrons, ions, neutres)

II-2. Distribution d'énergie électronique (EEDF)

II-3. Équilibre local/non local

II-4. Couplage électromagnétique et énergétique

II-4-1. Mécanismes d'excitation et d'ionisation

II-4-2. Rôle des électrons énergétiques

II-5. Cinétique chimique et création d'espèces réactives

#### **Chapitre III : Techniques de génération des plasmas froids (3 semaines)**

III-1. Décharges à basse pression

III-1-1. Décharges capacitatives (CCP)

III-1-2. Décharges inductives (ICP)

III-2. Plasmas à pression atmosphérique

III-2-1. Jets de plasma

III-2-2. Décharges à barrière diélectrique (DBD)

III-2-3. Micro-décharges

### III-3. Sources pulsées et à micro-ondes

## **Chapitre IV : Cinétique des plasmas hors équilibre (3 semaines)**

IV-1. Processus collisionnels : excitation, ionisation, attachement, dissociation, recombinaison

IV-2. Rôle des électrons : ionisation secondaire, formation d'espèces actives

IV-3. Temps caractéristiques : collisionnel, de relaxation, de diffusion

## **Chapitre V : Modélisation des plasmas froids (4 semaines)**

V-1. Modèles fluides vs modèles cinétiques

V-2. Équations de Boltzmann et de transport

V-3. Hypothèses d'équilibre local partiel

V-4. Modèles à deux températures

V-5. Approximations en régime hors équilibre

V-6. Codes et logiciels utilisés (COMSOL, BOLSIG+, etc.)

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

### **Références bibliographiques :**

- Fridman, Alexander. *Plasma Chemistry* Éditeur : Cambridge University Press, 2008.
- Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, Édition : 2e édition, Wiley-Interscience, 2005.
- Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., & van der Mullen, J. *Gas discharge plasmas and their applications Spectrochimica Acta Part B*, 2002. DOI : 10.1016/S0584-8547(02)00089-8
- Capitelli, M., Ferreira, C. M., Gordiets, B., & Osipov, A. *Plasma Kinetics in Atmospheric Gases* Éditeur : Springer Science & Business Media, 2013.
- Go, D. B., & Sen, A. *Non-equilibrium plasma-liquid interactions: Fundamentals and applications Plasma Sources Science and Technology*, 2016. DOI:10.1088/0963-0252/25/3/033002
- Plasmas froids : Génération, caractérisation et technologies Broché – 1 septembre 2004 **de Françoise Massines**
- Physique des plasmas froids [Bernard Held](#) Elsevier Masson
- Plasma Froid ; Generation, Caracterisation Et Technologies, Editeur : P u de saint etienne
- Plasmas collisionnels Physique des décharges RF et micro-onde De [Michel Moisan](#) et [Jacques Pelletier](#) EDP Sciences - Collection : [Grenoble Sciences](#) - 2<sup>e</sup> édition - avril 2014

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UEF 3**

**Matière 2 : Interaction laser – matière**

**VHS: 22h30 (Cours: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement**

- Comprendre les mécanismes physiques de l'interaction entre un faisceau laser et différents types de matière (solide, liquide, gaz).
- Analyser les régimes d'interaction en fonction de la puissance, la durée d'impulsion, et la longueur d'onde.
- Étudier les effets induits : chauffage, ablation, ionisation, modifications structurales.

### **Connaissances préalables recommandées .**

Optique , Électromagnétisme Thermodynamique, transfert thermique.

### **Contenu de la matière**

#### **Chapitre I : Introduction générale (2 semaines)**

1. Historique et développement des lasers
2. Rappels sur les propriétés des lasers
  - Cohérence, monochromaticité, directivité
  - Impulsions continues vs impulsions ultra-courtes
3. Paramètres pertinents de l'interaction
  - Fluence, intensité, durée d'impulsion, longueur d'onde, taux de répétition
4. Domaines d'applications : science des matériaux, physique des plasmas, médecine, spectroscopie, etc.

#### **Chapitre II : Interactions faibles : régimes linéaires (2 semaines)**

1. Absorption optique linéaire
  - Loi de Beer–Lambert
  - Absorption dans solides, liquides et gaz
2. Réflexion, transmission, dispersion
  - Indice de réfraction complexe
  - Propagation dans milieux dispersifs ou absorbants
3. Effets thermo-optiques et excitation non destructive

#### **Chapitre III : Interactions non linéaires : régimes intenses (2 semaines)**

1. Absorption multiphotonique
2. Ionisation tunnel et ionisation avalanche
3. Effets optiques non linéaires
  - Changement d'indice (Kerr), auto-focalisation
  - Harmoniques d'ordre supérieur (HHG)
4. Umklapp et brisure de symétrie dans cristaux

#### **Chapitre IV: Ablation laser et dépôt d'énergie (3 semaines)**

1. Dépôt d'énergie dans les solides
  - Régime thermique vs régime non thermique
2. Seuil d'ablation et dynamique de l'ablation
  - Mécanismes : vaporisation, explosion coulombienne, éjection de particules
3. Régime nanoseconde vs femtoseconde
4. Applications : micro-usinage, chirurgie laser, dépôt de couches minces

### **Chapitre V : Formation et dynamique de plasmas induits par laser (2 semaines)**

1. Seuil de plasma
2. Génération de plasma en surface ou dans le volume
3. Expansion du plasma, onde de choc, gradients thermiques
4. Cas particuliers : plasma dans liquides ou gaz

### **Chapitre VI : Techniques de diagnostic de l'interaction (2 semaines)**

1. Imagerie et interférométrie
2. Spectroscopie d'émission induite par laser (LIBS)
3. Shadowgraphie, schlieren, polarimétrie
4. Méthodes temps-résolu et pompe-sonde

### **Chapitre VII : Applications avancées (2 semaines)**

1. Spectroscopie laser pour l'analyse élémentaire (LIBS, LIF)
2. Accélération de particules par laser (Laser Wakefield Acceleration)
3. Traitement de surface, texturation, nano-fabrication
4. Thérapies médicales par laser, photothermie, chirurgie ophtalmique
5. Imagerie laser et capteurs optiques

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 33.% ; Examen: 67%.

### **Références bibliographiques :**

- 1- Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Theory and Applications (Series in Optical Sciences Series, n° 182) Auteur : MUSAZZI Sergio
- 2- Lasers. Interaction lumière-atomes Broché – 1 janvier 2002  
de [Jean-Pierre Faroux](#) (Auteur), [Bernard Cagnac](#) (Auteur)
- 3- Lasers à impulsions ultrabrèves : applications - Nature spécifique de l'interaction laser-matière en mode ultrabref
- 4- <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-automatique-th13/sources-laser-42452210/lasers-a-impulsions-ultrabreves-applications-e6455/nature-specifique-de-l-interaction-laser-matiere-en-mode-ultrabref-e6455niv10001.html>
- 5- LE LASER ; Edition EDP Sciences, collection "une introduction à..." - Préface de Charles H. Townes
- 6- Applications of Laser-Plasma Interactions Shalom Eliezer, Kunioki Mima

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UEM 3**

**Matière 1 : Numerical Analysis II**

**VHS: 45h (Cours: 1h30, TP: 1h30)**

### **Learning Objectives:**

This course aims to deepen the foundational knowledge required for the mathematical formulation of physics problems, by applying methods such as the finite difference method, finite element method. Emerging tools based on deep learning and artificial intelligence, including Physics-Informed Neural Networks (PINNs), may be introduced to complement traditional numerical methods."

### **Recommended Prerequisites**

Calculus – Algebra – Scientific programming using Python and its libraries.

### **Course Content:**

#### **Chapter 1. Numerical Solution of Partial Differential Equations – Finite Difference Method:**

1. Approximation of first and second derivatives
2. Stationary finite difference schemes:
3. Matrix formulation of the schemes: Application to Laplace 1D et 2D equations
4. Evolution finite difference schemes
5. Stability criterion for time-discretization schemes
6. Matrix formulation of the time-schemes: Application to Heat diffusion and transport equations.
7. Practical exercise using Python programming

#### **Chapter 2. Numerical Solution of Partial Differential Equations – Finite Element Method:**

1. Problem Formulation (Weak or Variational Form)
2. Domain Discretization (Meshing)
3. Shape Functions or Interpolation
4. Assembly of the System and application of Boundary Conditions.
5. Practical exercise using FreeFEM++

#### **Chapter 3. Physics-Informed Neural Networks: PINNS**

1. General Introduction
  - a. Basics of neural networks (MLP architecture)
  - b. Differential equations
2. Motivation :
  - a. Limitations of classical numerical methods (meshing, complexity)
  - b. Why PINNs? A bridge between AI and physical modeling
3. Core Concepts of PINNs
  - a. Approximating the solution using a neural network
  - b. Building the loss function:
    - Physics term (differential equation residual)
    - Boundary conditions (Dirichlet, Neumann, etc.)
  - c. Automatic differentiation

- d. Global scheme of a PINN
- 4. Python Implementation: Required libraries: TensorFlow or PyTorch
  - Case study : Laplace equation in 1D or 2D, steps:
  - Generate training points/
  - Define the neural network architecture
  - Construct the loss function
  - Train the model and visualize the results

**Evaluation Method:**

Knowledge evaluation will consist of a written exam (50%), practical works (50%).

**References**

- [1]Scientific Computing and Differential Equations, Gene H. Golub, James M. Ortega, 1992.
- [2]Introduction to Numerical Analysis, R. Bulirsch, W. Gautschi, and C. Witzgall, 1992
- [3]Hecht, F. (2012). New development in FreeFem++. Journal of Numerical Mathematics, 20(3-4), 251–265.
- [4]<https://freefem.org>
- [5]Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. Journal of Computational Physics, 378, 686–707.

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UEM 3**

**Matière 2 : Intelligence artificielle Approfondis**

**VHS: 45 h (Cours: 1h30, TP: 1h30)**

### **Objectifs du cours**

- Approfondir les concepts fondamentaux de l'IA
- Explorer les techniques avancées : apprentissage profond, apprentissage par renforcement, modèles génératifs
- Maîtriser les outils modernes (TensorFlow, PyTorch, etc.)
- Développer une capacité critique sur les enjeux éthiques, sociaux et techniques

### **Connaissances préalables recommandées:**

Programmation en Python , Mathématiques pour l'IA Calcul différentiel, Probabilités / Statistiques, Bases de l'apprentissage automatique, Logique et algorithmique

### **Contenu de la matière:**

#### **Chapitre 1 : Rappels et fondements**

1. Introduction générale à l'IA et ses domaines d'application
2. Rappels mathématiques : optimisation, statistiques, probabilités
3. Rappels sur les méthodes d'apprentissage supervisé / non supervisé

#### **Chapitre 2 : Apprentissage profond (Deep Learning)**

1. Réseaux de neurones artificiels : MLP, fonction de coût, backpropagation
2. Réseaux convolutifs (CNN) pour la vision
3. Réseaux récurrents (RNN, LSTM, GRU) pour les séquences
4. Techniques avancées : Dropout, BatchNorm, attention, transfert learning

#### **Chapitre 3 : Apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning)**

1. Fondements : agent, environnement, récompense, fonction de valeur
2. Q-learning, SARSA, DQN
3. Méthodes de politique : Policy Gradient, PPO, A3C

#### **Chapitre 4 : IA générative**

1. Réseaux antagonistes génératifs (GANs) : principes, variantes
2. Autoencodeurs, VAE
3. Modèles de langage avancés (transformers, BERT, GPT)

#### **Chapitre 5 : Interprétabilité, robustesse, éthique**

1. Interprétabilité des modèles (SHAP, LIME)
2. Biais algorithmiques et discrimination
3. Robustesse, attaques adverses, sécurité de l'IA
4. L'IA responsable : enjeux sociaux, légaux et environnementaux

#### **Chapitre 6 : Applications et projets**

1. Traitement du langage naturel (NLP)
2. Vision par ordinateur

3. IA en robotique, jeux et simulations
4. Présentation des projets étudiants

### **Travaux pratiques (TP)**

- Implémentation d'un perceptron multicouche à la main
- Classification d'images avec CNN
- Génération de texte avec un modèle de langage
- Simulation d'agent intelligent dans un environnement (RL)
- Analyse d'un modèle GPT via l'API OpenAI ou HuggingFace

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 50.% ; Examen: 50 %.

### **Références**

- *Deep Learning* – Ian Goodfellow et al.
- *Reinforcement Learning: An Introduction* – Sutton & Barto
- *Pattern Recognition and Machine Learning* – Bishop
- *The Elements of Statistical Learning* – Hastie et al.
- Documentation : [PyTorch](#), [HuggingFace](#), [OpenAI](#)

**Semestre: S3**

**Unité d'enseignement: UEM 3**

**Matière 3 : Accélération des particules par interaction laser-plasma**

**VHS: 22h30 (Cours: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement:**

- Comprendre le rôle des plasmas dans les technologies d'accélération de particules.
- Étudier les principes physiques de l'accélération plasma (accélération par sillage plasma).

**Connaissances préalables recommandées:**

physique des plasma, physique des lasers , physique des particules

**Contenu de la matière:**

**1. Introduction générale (2 semaines)**

- Historique de l'accélération de particules
- Limites des accélérateurs conventionnels (RF linéaires, synchrotrons)
- Motivation pour l'accélération basée sur le plasma : gradients d'accélération ultra-élevés

**2. Bases physiques de l'accélération plasma (3 semaines)**

- Notions de sillage (wakefield) dans un plasma
- Oscillations plasma et fréquence plasma
- Génération d'un champ électrique longitudinal intense

**3. Accélération par laser-plasma (2 semaines)**

- Principe de création d'une onde plasma par impulsion laser ultra-courte
- Injection et piégeage des électrons dans l'onde de sillage
- Régimes d'accélération : régimes linéaire, non-linéaire, bubble

**4. Accélération par faisceau-plasma (2 semaines)**

- Principe de création d'une onde plasma par faisceau d'électrons ou de protons
- Structure du champ électrique généré
- Comparaison entre LWFA et PWFA

**5. Sources de plasma pour les accélérateurs (3 semaines)**

- Techniques de génération de plasma : décharge électrique, ionisation laser
- Diagnostics du plasma pour les accélérateurs
- Contrôle de la densité et homogénéité du plasma

**6. Applications des accélérateurs laser-plasma (3 semaines)**

- Sources compactes de rayons X et gamma
- Imagerie médicale : radiothérapie avec faisceaux d'ions
- Applications en physique fondamentale : collisionneurs compacts, physique nucléaire

- Applications industrielles : radiographie ultrarapide de matériaux
- 

**Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

**Références bibliographiques :**

- 1. "Plasma Physics and Fusion Energy" – Ian H. Hutchinson Éditeur : CRC Press, 2006
- 2. "Laser-Plasma Interactions and Applications" – A. Pukhalov, A. Fedotov, et al. Éditeur : Springer, 2020
- 3. "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 2: Plasma Applications" – Francis Chen Éditeur : Springer, 2008
- 4. "The Physics of Laser Plasma Interactions" – Gerry M. H. Haines Éditeur : Springer, 2017
- 5. "High-Energy-Density Physics: Fundamentals, Inertial Fusion, and Experimental Applications" – William S. Hogan, Jerry W. M. S. L. Éditeur : Springer, 2016
- 6. "Laser Wakefield Acceleration" – T. Tajima et J. M. Dawson Éditeur : Springer, 2009
- 7. "Plasma Physics and Controlled Fusion" – B.B. Kadomtsev et al. Éditeur : Springer, 2011

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UED 3**

**Matière 1 : Plasma Astrophysique et Milieu Interstellaire**

**VHS: 22h30(Cours: 1h30)**

### **Objectifs de l'enseignement**

- Comprendre le rôle fondamental des plasmas dans l'Univers.
- Étudier les propriétés des plasmas astrophysiques : étoiles, nébuleuses, vent solaire, milieux interstellaires

### **Connaissances préalables recommandées .**

Phénomènes de base dans les plasmas – physique des rayonnements  
magnétohydrodynamique.

13-

### **Contenu de la matière**

#### **Chapitre I : Introduction générale (3 semaines)**

- Qu'est-ce qu'un plasma astrophysique ?
- Importance des plasmas dans l'Univers (99 % de la matière visible)
- Différence entre plasma de laboratoire et plasma astrophysique

#### **Chapitre II : Propriétés fondamentales des plasmas astrophysiques (3 semaines)**

- Température, densité, magnétisation
- Échelles de temps et de longueur caractéristiques
- Théorie de la magnétosphère
- Effets des champs magnétiques (force de Lorentz, conduction anisotrope)

#### **Chapitre III : Processus physiques majeurs (3 semaines)**

- Ionisation : photoionisation, collisions
- Recombinaison : radiative, diélectronique
- Instabilités dans les plasmas (instabilité de Rayleigh-Taylor, instabilités magnétohydrodynamiques)
- Turbulence dans les plasmas astrophysiques
- Ondes de plasma et propagation des ondes dans les milieux magnétiques

#### **Chapitre IV : Milieu interstellaire (3 semaines)**

- Structure du milieu interstellaire (régions HII, HI, nuages moléculaires)
- Phénomènes de choc dans le milieu interstellaire (ondes de choc, fronts d'ionisation)
- Interaction vent stellaire - milieu interstellaire
- Formation des étoiles et rôle du plasma

#### **Chapitre V : Applications spécifiques (3 semaines)**

- Plasma du vent solaire et magnétosphères planétaires
- Jets relativistes et accréation autour des trous noirs
- Plasmas dans les nébuleuses planétaires et les supernovae
- Radiations cosmiques et accélération des particules (chocs astrophysiques)

### **Chapitre VI : Observation et diagnostic (3 semaines)**

- Emission thermique (corps noir, bremsstrahlung)
- Emission non thermique (synchrotron, effet Compton inverse)
- Spectroscopie du milieu interstellaire : lignes d'émission, d'absorption
- Utilisation des satellites et radioastronomie pour sonder les plasmas astrophysiques

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 0% ; Examen: 100%.

### **Références bibliographiques :**

- 1.Ouvrages généraux sur l'astrophysique des plasmas
- "Plasma Astrophysics" (Volume I & II) par Vladimir A. Zheleznyakov
- "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion" par Francis Chen
- "Astrophysical Plasmas: The Physics of Ionized Gases" par Stavros K. Vlahos
- Ouvrages spécifiques au milieu interstellaire
- "The Interstellar Medium" par J. E. Dyson et D. A. Williams
- "Interstellar and Intergalactic Medium" par L. Spitzer
- "The Physics of the Interstellar Medium" par J. C. McKee et J. P. Ostriker
- "Magnetohydrodynamics of the Sun" par Philip C. H. M. S. E. A. L.
- "Plasma Physics for Astrophysics" par Stuart A. Colgate

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UED 3**

**Matière 2 : Plasmas froids pour la médecine**

**VHS: 22h30(Cours: 1h30)**

## **Objectifs de l'enseignement**

L'objectif principal de ce cours est de fournir aux étudiants une compréhension approfondie des plasmas froids, de leurs propriétés physiques et de leurs applications dans le domaine médical.

## **Connaissances préalables recommandées .**

Phénomènes de base dans les plasmas – physique des rayonnements magnétohydrodynamique.

## **Contenu de la matière**

### **Chapitre I : Introduction aux plasmas froids (3 semaines)**

#### **I-1. Définition et caractéristiques des plasmas froids**

- Qu'est-ce qu'un plasma froid ?
- Différences entre plasmas froids et plasmas chauds
- Propriétés physiques et électromagnétiques des plasmas froids.

#### **I-2. Production et régulation des plasmas froids**

- Techniques de génération : décharges à pression atmosphérique, jets de plasma, décharges micro-ondes, etc.
- Contrôle de la température, de la densité et des espèces générées dans le plasma.

### **Chapitre II : Interactions plasmas froids - Matière biologique (3 semaines)**

#### **II-1. Interaction entre le plasma et les cellules biologiques**

- Mécanismes d'interaction : ionisation, dissociation, production de ROS/RNS (espèces réactives de l'oxygène et de l'azote).
- Effets des plasmas sur les membranes cellulaires et les structures biologiques.

#### **II-2. Effets biologiques des plasmas froids**

- Destruction cellulaire et effets antimicrobiens.
- Stimulation des processus biologiques : cicatrisation, régénération des tissus, réduction des inflammations.

### **Chapitre III : Plasmas froids pour la stérilisation et la désinfection (3 semaines)**

- Désinfection des instruments médicaux, des surfaces et des dispositifs médicaux.
- Utilisation des plasmas froids pour la stérilisation en milieu hospitalier.
- Comparaison avec d'autres méthodes de désinfection (chaleur, produits chimiques, rayonnement, etc.).

### **Chapitre IV : Cicatrisation et régénération tissulaire par plasma froid (3 semaines)**

Effet des plasmas froids sur la cicatrisation des plaies chroniques, brûlures et autres affections cutanées.

- Mécanismes sous-jacents à la stimulation de la régénération tissulaire.
- Études de cas et essais cliniques.

## **Chapitre V : Applications dans le traitement du cancer (3 semaines)**

- Effets cytotoxiques des plasmas froids sur les cellules cancéreuses.
- Plasmas froids dans la thérapie de tumeurs et la réduction de la croissance tumorale.
- Protocole et perspectives de traitements combinés avec la chimiothérapie ou la radiothérapie.

Technologies et dispositifs de plasmas froids en médecine

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 0% ; Examen: 100%.

### **Références bibliographiques :**

- "Plasma Medicine: Applications of Low-Temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology"
- Auteurs : R. Stolz, P. R. C. G. L. G. S. P. S. T.
- "Plasma for Biomedicine: From Science to Clinical Applications"
- Auteurs : Paul K. Chu et Zhiwei Chen Éditeur : Springer
- "Low-Temperature Plasma Technology: Methods and Applications"
- Auteurs : Z. V. Shvets, A. M. K. J. et al. Éditeur : CRC Press
- "Biological and Medical Applications of Plasmas" Auteurs : Rainer H. S. et al.
- "Plasma Medicine: Applications of Low-Temperature Plasmas in Medicine and Biology"
- Auteurs : Olof D. et al. Éditeur : Springer

**Semestre: 3**

**Unité d'enseignement: UET 3**

**Matière 2 : Entrepreneuriat, Startup et Innovation**

**VHS: 22h30(Cours: 1h30)**

**Objectifs de l'enseignement :**

Donner aux étudiants une vision globale de l'entrepreneuriat moderne, développer leur esprit entrepreneurial et leur capacité à initier un projet.

**Contenu de la matière :**

**Chapitre 1 : Fondements de l'Entrepreneuriat**

- Définition, création de valeur par l'innovation et la prise de risque.
- Piliers : opportunité, innovation, gestion du risque, création de valeur.
- Écosystème : chercheurs-entrepreneurs, investisseurs, incubateurs, clusters.
- Processus : Idéation → Validation → Business Plan → Lancement → Croissance.
- Enjeux scientifiques : brevets, normes, financement R&D, équipes pluridisciplinaires.
- Cas pratiques : simulation de dépôt de brevet, recherche de financement.

**Chapitre 2 : L'esprit entrepreneurial dans les sciences et technologies**

- Comprendre l'entrepreneuriat scientifique et technologique.
- Esprit entrepreneurial : créativité, innovation, résilience, gestion du risque.
- Motivations à entreprendre dans les domaines scientifiques et technologiques.
- Grands secteurs d'opportunités : énergie, santé, matériaux, numérique, environnement, sciences alimentaires.

**Chapitre 3 : De la recherche scientifique à l'opportunité entrepreneuriale**

- Transformer une découverte scientifique ou technologique en projet entrepreneurial.
- Approche "problème-solution" : identifier un besoin réel.
- Initiation à l'étude de marché pour projets scientifiques.
- Validation rapide d'une idée : prototype minimum viable (MVP), enquêtes, tests utilisateurs.

**Chapitre 4 : Construire et modéliser son projet innovant**

- Introduction au Business Model Canvas (BMC) pour projets technologiques.
- Définir une proposition de valeur claire et différenciante.
- Identifier ressources, partenaires stratégiques, canaux de distribution.

**Chapitre 5 : Lancer son projet scientifique ou technologique**

- Étapes clés pour passer de l'idée au projet structuré.
- Sources classiques de financement en phase de démarrage : fonds d'amorçage, concours, soutiens privés.
- Savoir pitcher : vulgariser une innovation pour convaincre investisseurs, partenaires et premiers clients.
- Erreurs fréquentes à éviter : mauvaise évaluation du marché, développement technologique déconnecté du besoin réel.

**Chapitre 6 : Réussir et se développer comme entrepreneur scientifique**

- Gestion du risque et de l'incertitude dans les projets innovants.
- Stratégies de pivot : adapter son projet selon les retours du marché.
- Leadership scientifique : organiser et animer une équipe pluridisciplinaire.

- Bases de la propriété intellectuelle : brevets, licences, valorisation de l'innovation, protection.
- Entrepreneuriat à impact : répondre aux défis environnementaux, sociaux et économiques.
- Continuer à progresser : réseaux d'innovation, incubateurs, mentors, formations continues.

**Mode d'évaluation:**

Examen: 100%.

**Références :**

- Verstraete, Thierry, et Fayolle, Alain, Entrepreneuriat : Fondements et dynamiques. Édition De Boeck Supérieur, 2005.
- Julien, Pierre-André, Entrepreneuriat : devenir entrepreneur : théories et pratiques. Édition Économica, 2007.
- Schieb-Bienfait, Nathalie, et Lemoine, Valérie, Entrepreneuriat : théories et réalités entrepreneuriales. Édition EMS (Management & Société), 2013.
- Fayolle, Alain, Entrepreneuriat : Apprendre à entreprendre, Édition Dunod, 2014.