

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 901 Numerical methods and applications

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Hervé Rinnert herve.rinnert@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	TP	EqTD
EC 901.1 Numerical methods and applications	2800	15	15	37,5

## Descriptif

# English version below

Cette unité d'enseignement, commune aux masters MQN et PPEF, est consacrée aux méthodes de calcul numériques appliquées à des problèmes de physique en proximité avec les champs de recherche des matières condensées et diluées.

Ceux-ci impliquent souvent la résolution d'équations différentielles, des approches statistiques et de l'échantillonnage, nécessitant d'aborder des méthodes numériques spécifiques.

Une partie CM se concentre sur les notions théoriques, et ne nécessite pas l'utilisation d'un ordinateur. Une partie TP se déroule en grande partie sur machine, dans le langage python.

CM :

- Discrétisation, conditions aux bords
- Normalisation (adimensionnalisation)
- Procédure générale de développement d'un code de résolution numérique d'équations aux dérivées ordinaires (EDO) et partielles (EDP)
- Représentation d'un nombre en virgule flottante, et erreurs d'arrondis
- Analyse de schémas numériques (erreur numérique, convergence, stabilité numérique)

TP :

- Partie Monte-Carlo :
  - o Calcul de pi par échantillonnage simple, marche aléatoire
  - o Echantillonnage pondéré, oscillateur harmonique
  - o Chaîne de Markov, algorithme de Metropolis
  - o Applications à des modèles simples et au modèle d'Ising
  - o Convergence de la chaîne et calcul d'erreur
- Partie équations différentielles :
  - o Dérivées, intégrales
  - o Application aux EDO, méthode d'Euler

- o Interpolation
- o Application aux EDP, advection

This course, common to the MQN and PPEF masters, is devoted to numerical calculation methods applied to physics problems close to the fields of research of condensed and diluted matter. These often involve solving differential equations, statistical approaches and sampling, requiring specific numerical methods to be addressed. A part focuses on theoretical notions, and does not require the use of a computer. A practical part takes place using computers in the Python language.

CM:

- Discretization, boundary conditions - Normalization
- General procedure for developing a code for the numerical resolution of ordinary differential equations (ODE) and partial differential equations (PDE)
- Representation of a floating point number, and rounding errors
- Analysis of numerical schemes (numerical error, convergence, numerical stability)

Practicals:

- Monte Carlo:
  - o Calculation of pi by simple sampling, random walk
  - o Weighted sampling, harmonic oscillator
  - o Markov chain, Metropolis algorithm
  - o Applications to simple models and to the Ising model
  - o Chain convergence and error calculation
- Differential equations:
  - o Derivatives, integrals
  - o Application to ODEs, Euler method
  - o Interpolation
  - o Application to PDEs, advection

## Pré-requis

Développement de Taylor, bases de physique statistique, notions d'algorithme, bases de programmation en langage Python.

## Acquis d'apprentissage

Boîte à outils de méthodes numériques pour applications à la physique statistique et à la dynamique.

Procédures d'analyse de méthodes numériques.

## Compétences visées

BC 1. Usages avancés et spécialisés des outils numériques

- Identifier les principaux outils du domaine du numérique (architecture, langages, bibliothèques...),
- Se servir de façon autonome des outils numériques avancés pour un ou plusieurs métiers ou secteurs de recherche du domaine,
- Développer un algorithme adapté à un problème spécifique du domaine,

- Écrire un programme dans au moins un langage de programmation

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2. Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 902 Fundamentals of plasma physics 1

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 902.1 Fundamentals of plasma physics 1	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

Présentation générale des plasmas, longueurs et fréquences caractéristiques, problème à N corps, enjeux de la modélisation.

Equations fluides, ondes acoustiques ioniques, coefficients de diffusion et de mobilité (plasmas froids : collisions avec les neutres dominantes), diffusion ambipolaire, gaines, modèles de transport en plasmas chauds (collisions coulombiennes dominantes ou diffusion turbulente).

Trajectoire des particules chargées dans un champ magnétique, dérives et moment magnétique comme invariant adiabatique, notion de miroir magnétique.

Equations cinétiques. Limite des modèles fluides, lien avec les moments de la fonction de distribution, équation de Vlasov, équation de Boltzmann et applications : Maxwellienne comme distribution d'équilibre, phénomène d'isotropisation et temps de relaxation associé.

General presentation of plasmas, characteristic lengths and frequencies, N-body problem, modeling issues. Fluid equations, ionic acoustic waves, diffusion and mobility coefficients (cold plasmas: collisions with neutrals), ambipolar diffusion, sheaths, transport models in hot plasmas (Coulomb collisions or turbulent diffusive transport). Trajectory of charged particles in a magnetic field, drifts and magnetic moment (adiabatic invariant), magnetic mirror. Kinetic equations. Limit of fluid models, link with moments of the distribution function, Vlasov equation, Boltzmann equation and applications: Maxwellian as equilibrium distribution function, isotropization process and associated relaxation time.

## Pré-requis

Bases de l'électrodynamique, de la mécanique des fluides et de la physique statistique.

## Acquis d'apprentissage

Echelles caractéristiques des plasmas, rôle des collisions. Connaissance des différents niveaux de modélisation des plasmas et de leur domaine d'application. Modélisation élémentaire des gaines. Notion d'invariants propres aux plasmas magnétisés. L'étudiant devra avoir, à l'issue de ce cours, une bonne compréhension de la différence entre les plasmas chauds et les plasmas froids.

## Compétences visées

Bloc(s) de compétences associé(s) (selon fichier BCC\_ST\_Master physique) :

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1 Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 903 Fundamentals of plasma physics 2

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 903.1 Décharge dans les gaz	3000	15	22,5
EC 903.2 Modélisation des plasmas chauds	3000	15	22,5

## Descriptif

# English version below

Cet enseignement constitue la deuxième partie du tronc commun. Il sera divisé en deux parties : la première traitant des décharges électriques dans les gaz la seconde des modèles utilisés en « plasmas chauds ».

Décharge dans les gaz :

Phénomènes élémentaires (coefficients de Townsend) et description d'une décharge continue : phénomène d'amorçage (loi de Paschen), structure spatiale d'une décharge diode. Décharge couronne d'arc.

Décharge radiofréquence et ses applications : couplage capacitif et inductif, tension d'auto-polarisation, applications aux dépôts et la gravure.

Décharge microonde : présentation des différents types avec ou sans champ magnétique.

Modélisation des plasmas chauds :

Etablissement des équations fluides à partir d'équations cinétiques, relation de fermeture.

Etablissement des équations de la magnéto hydrodynamique (MHD), ondes d'Alfvén.

Amortissement Landau.

This course is the second part of "Fundamentals of plasma physics". It will be divided into two parts: The first dealing with electrical discharges in gases, the second with models used in "high temperature plasmas".

Gas discharge:

Elementary phenomena (Townsend coefficients) and description of a continuous discharge: ignition phenomenon (Paschen's law), spatial structure of a diode discharge. Corona arc discharge.

Radiofrequency discharge and its applications: capacitive and inductive coupling, self-polarization voltage, applications to deposition and etching.

Microwave discharge: Presentation of the different types with or without magnetic field.

Modeling of high temperature plasmas:  
Fluid equations derived from kinetic equations, closure relation. Magnetohydrodynamic (MHD) equations, Alfvén waves. Landau damping.

## Pré-requis

Physique des plasmas 1 : module 902

## Acquis d'apprentissage

À l'issue de ce cours, les étudiants devraient maîtriser les aspects théoriques des décharges plasmas utilisés dans les laboratoires de recherche et dans l'industrie.

Ils devraient également, grâce à la deuxième partie, maîtriser les différents niveaux de modélisation des plasmas chauds et leur domaine d'application.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1 Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 904 Plasma-surface interactions

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 904.1 Plasma-surface interactions	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

Cet enseignement développe les concepts de l'interaction plasma paroi pour l'étude de la physique des plasmas en contact avec une surface. Le but de cet enseignement est de fournir une première approche des phénomènes physiques de l'interaction plasma-surface, effets collisionnels, gaines, modélisation fluide et/ou cinétique, phénomènes d'ionisation, recombinaison, érosion, gravure).

1. Gains
2. Equilibre d'ionisation dans un plasma (rappels de UE 903)
  - 2.1. Section efficace d'ionisation
  - 2.2. Taux et longueur d'ionisation
  - 2.3. Equilibre d'ionisation
3. Erosion de la paroi et (re)déposition
  - 3.1. Phénomènes d'interaction plasma surface (Pulvérisation, gravure, dépôt ...)
  - 3.2. Plasma Froid
    - 3.2.1. Pulvérisation magnétron
    - 3.2.2. Gravure RIE et profonde
  - 3.3. Plasma chaud
    - 3.3.1. Choix des matériaux pour les composants face au plasma
    - 3.3.2. Redéposition prompte (présence d'un champ magnétique)
4. Mécanismes de recyclage, temps de confinement
  - 4.1. Recyclage
  - 4.2. Temps de confinement, modèle d'Engelhardt
  - 4.3. Bilan, recirculation des particules (modèle de réservoirs)



5. Modèle scrape-off-layer (facultatif)
  - profils radiaux
  - longueur caractéristique de décroissance de la densité et de la température

This course provides the basics of plasma wall interaction and presents a first approach to the physical phenomena of plasma-surface interaction, collisional effects, sheaths, fluid and/or kinetic modeling, ionization phenomena, recombination, erosion, etching.

1. Sheaths
2. Ionization equilibrium in a plasma (reminders of UE 903)
  - 2.1. Ionization cross section
  - 2.2. Rate and length of ionization
  - 2.3. Ionization balance
3. Wall erosion and (re)deposition
  - 3.1. Plasma surface interaction phenomena (sputtering, etching, deposition, etc.)
  - 3.2. Cold Plasma
    - 3.2.1. Magnetron sputtering
    - 3.2.2. RIE and deep etching
  - 3.3. High temperature plasma
    - 3.3.1. Choice of materials for plasma-facing components
    - 3.3.2. Prompt redeposition (presence of a magnetic field)
4. Recycling mechanisms, confinement time
  - 4.1. Recycling
  - 4.2. Confinement time, Engelhardt model
  - 4.3. Balance, particle recirculation (reservoir model)
5. Scrape-off-layer model (optional)
  - Radial profiles
  - Characteristic length of decrease of density and temperature

## Pré-requis

Modules 902 et 903.

Bases de la physique des plasmas - Basic plasma physics.

En fonction du public suivant l'UE, l'enseignement se fera en anglais ou en français.

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant devra être capable de décrire la physique de base des plasmas en contact avec une surface, et notamment la notion d'interaction plasma-paroi (flux de particules, pulvérisation, etc.). Il devra pouvoir expliquer le choix des matériaux faisant face au plasma dans un réacteur plasma.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 905 Caractérisation des plasmas, diagnostics

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 905.1 Diagnostics	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

Ce module traitera des diagnostics de base nécessaires à la caractérisation des plasmas. L'aspect théorique et l'aspect expérimental seront présentés pour chaque diagnostic.

Il sera divisé en deux parties :

- Les diagnostics permettant de caractériser les particules chargées (électrons, ions) seront présentés :
  - o Sonde de Langmuir : mesure de  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $f_{dee}$ ,  $V_p$ ,  $V_f$ .
  - o Théorie classique sans champ magnétique : Sonde simple et doubles sondes.
  - o présentation des problèmes liés à l'utilisation des sondes (haute pression, champ magnétique,...)
  - o Utilisation dans le cas de fluctuations des différents paramètres plasmas
    - o Interférométrie micro-onde ou optique : (mesure de  $n_e$ ) inversion tomographique (cas d'une symétrie de révolution)
    - o Diffusion Thomson (incohérente et cohérente), polarimétrie
    - o Réflectométrie classique (profils moyen de densité), mention de la réflectométrie comme diagnostic de la turbulence grâce aux phénomènes de diffusion tout au long de la propagation du faisceau
- L'étude des espèces neutres et des ions détectables par spectroscopie optique d'émission :
  - o Rappels généraux de physique atomique et moléculaire
  - o Spectre atomique, température d'excitation, élargissement de raies
  - o Spectre moléculaire, températures de vibrations et de rotations
  - o Applications particulières de la spectroscopie : titration NO pour la mesure de la concentration d'azote atomique, actinométrie (principes et limites)
  - o Emission beam spectroscopy

This course will deal with the basic diagnostics necessary for the characterization of plasmas. The theoretical and experimental aspects will be presented for each diagnostic.

It will be divided into two parts:

- Diagnostics allowing the characterization of charged particles (electrons, ions) will be presented: Langmuir probe: measurement of  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $f_{dee}$ ,  $V_p$ ,  $V_f$ .
  - o Classical theory without magnetic field: Single probe and double probes.
  - o Presentation of problems related to the use of probes (high pressure, magnetic field, etc.)
  - o Use in the case of fluctuations of the different plasma parameters

Microwave or optical interferometry: (measurement of  $n_e$ ) tomographic inversion (case of rotational symmetry)

Thomson scattering (incoherent and coherent), polarimetry

Classical reflectometry (mean density profiles), mention of reflectometry as a diagnostic of turbulence thanks to scattering phenomena throughout the propagation of the beam

- Study of neutral species and ions detectable by optical emission spectroscopy:
  - o General reminders of atomic and molecular physics
  - o Atomic spectrum, excitation temperature, line broadening
  - o Molecular spectrum, vibration and rotation temperatures
  - o Specific applications of spectroscopy: NO titration for measuring the concentration of atomic nitrogen, actinometry (principles and limits)
  - o Emission beam spectroscopy

## Pré-requis

UE 902, 903 : Bases de la physique des plasmas

UE 906 : Ondes et transferts de puissance

## Acquis d'apprentissage

L'objectif de cette UE est d'aborder différents diagnostics des plasmas utilisés aussi bien en plasmas chauds qu'en plasmas froids.

A l'issue de cette UE, les étudiants auront une bonne connaissance des diagnostics classiques utilisés pour l'étude et/ou le contrôle des procédés plasmas. Les aspects théoriques et pratiques seront abordés pour les différents diagnostics. Ce module devrait permettre à l'étudiant d'avoir les connaissances nécessaires pour la mise en œuvre et l'interprétation de mesures expérimentales.

## Compétences visées

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2 Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 906 Waves in plasmas - Heating

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 906.1 Waves in plasmas - Heating	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

Equations de Maxwell et établissement formel de l'équation d'onde dans un milieu diélectrique.

Obtention du tenseur diélectrique dans le cadre d'une modélisation fluide pour un plasma uniforme non-magnétisé puis magnétisé. Modes de propagation : photons et plasmons, ondes basse-fréquence. Notion de coupure et de résonance, vitesse de phase et de groupe.

Diagramme CMA pour les ondes en plasma magnétisé.

Tracé de rayon en milieu inhomogène.

Chauffage : Aspect thermodynamique, bilan. Puissance absorbée par un plasma collisionnel non-magnétisé, chauffage stochastique. Chauffage ohmique et sa limite pour l'application aux plasmas de fusion. Physique et technologie du chauffage par injection de neutres (chauffage collisionnel). Chauffage par onde, à fréquence cyclotronique électronique puis ionique : tenseur diélectrique obtenu par modélisation cinétique (plasma chaud), modélisation cinétique de l'absorption de puissance. Rôle de la polarisation de l'onde de chauffage. Le chauffage à résonance hybride basse pourra être abordée. Technologie de la production d'onde dans différentes gammes de fréquence.

Maxwell's equations and derivation of the wave equation in a dielectric medium. Deriving the dielectric tensor within the framework of a fluid modeling for a non-magnetized then magnetized uniform plasma. Modes of propagation: photons and plasmons, low-frequency waves. Notion of cut and resonance, phase and group velocities. CMA diagram for magnetized plasma waves. Ray tracing in an inhomogeneous medium.

Heating: Thermodynamic point of view, balance. Power absorbed by a non-magnetized collisional plasma, stochastic heating. Ohmic heating and its limit for application to fusion plasmas. Physics and technology of heating by neutral injection (collisional heating). Heating by wave, at electronic then ionic cyclotron frequency: dielectric tensor obtained by kinetic modeling (hot plasma), kinetic modeling of power absorption. Role of the polarization of the heating wave. Low hybrid resonance heating can be addressed. Wave generation technology in different frequency ranges

## Pré-requis

Electrodynamique classique, ondes électromagnétiques. Physique des plasmas 1.

## Acquis d'apprentissage

Equations d'onde dans un milieu diélectrique isotrope et anisotrope. Modes propres. Modélisation de la propagation en milieu inhomogène. Résonance et transfert de puissance. Notion de technologie de la production d'onde dans différentes gammes de fréquence. Modélisation d'un phénomène physique complexe.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1 Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 907 Transport, instabilities and turbulence

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 907.1 Transport, instabilities and turbulence	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

1. Introduction : transport in discharge plasmas and fusion plasmas. Transport equations  
Transport processes in a plasma, S. I. Braginskii, Reviews of Plasma Physics, NY, Vol. 1, p. 205 (1965)
2. Diffusion in ionized gases  
Fick's law – Diffusion equation – Solving the diffusion equation – Diffusion across a magnetic field – Diffusion in fully ionized plasmas
3. Diffusion as a random walk  
The mean square distance travelled by a particle as a result of random collisions – The diffusion equation
4. Coulomb collisions and collisions with neutrals. Transport due to collisions
5. Transport due to electromagnetic perturbations
6. Instabilities : examples

1. Introduction : transport dans les plasmas de décharge et les plasmas de fusion.  
Équations de transport. Processus de transport dans un plasma, S. I. Braginskii, Reviews of Plasma Physics, NY, Vol. 1, p. 205 (1965)
2. Diffusion dans les gaz ionisés  
Loi de Fick – Équation de diffusion – Résolution de l'équation de diffusion – Diffusion à travers un champ magnétique – Diffusion dans des plasmas totalement ionisés
3. Diffusion - marche aléatoire  
Distance moyenne parcourue par une particule à la suite de collisions aléatoires - L'équation de diffusion
4. Collisions coulombiennes et collisions avec les neutres. Transport dû à des collisions
5. Transport dû aux perturbations électromagnétiques
6. Instabilités : exemples

## Pré-requis

Modules 902 et 903.

Bases de la physique des plasmas - Basic plasma physics.

En fonction du public suivant l'UE, l'enseignement se fera en anglais ou en français.

Teaching will be in English or French according to the audience attending the lectures.

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant devra être capable de comprendre pourquoi la notion de transport est intimement liée à la notion d'état d'équilibre du plasma. En fonction des paramètres du plasma, il sera également capable d'utiliser différents modèles permettant d'étudier les différents profils de densité et de température pouvant apparaître dans le plasma, en fonction des mécanismes de transport. Il pourra ainsi évaluer et estimer les coefficients de transport de matière et de chaleur dans un plasma. Enfin, il sera capable de décrire certaines instabilités pouvant être observées dans les plasmas.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution.

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1. Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction.



**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE908 Méthodes expérimentales - Analyse & traitement données

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC908.1 Méthodes expérimentales-Analyse & traitement données	3000	30	45

## Descriptif

Cette unité d'enseignement est constituée d'un cours introductif suivi de trois séances expérimentales en laboratoire.

Le cours a pour objectif une présentation globale des réacteurs de recherche du laboratoire sur lesquels seront effectués les travaux pratiques (réacteur à configuration hélicon, réacteur ECR, réacteur PVD de pulvérisation cathodique magnétron). Les bases théoriques de la décharge radio-fréquence (autopolarisation, gaines RF, les différents modes de couplage de la puissance RF) seront traitées.

Trois séances de travaux pratiques auront lieu au laboratoire.

- Une séance sera dédiée à l'étude du couplage de la puissance radiofréquence dans un réacteur de type Helicon. Cette étude sera réalisée à l'aide de sondes électrostatiques pour la mesure des paramètres électriques de la décharge (potentiel plasma et potentiel flottant, densité et température électroniques).
- La pulvérisation d'une cible (titane, aluminium ou tungstène) par une décharge PVD magnétron sera ensuite étudiée. Les diagnostics de cette étude seront la fluorescence induite par diode laser et/ou l'absorption. La mesure par fluorescence permettra de déterminer la fonction de distribution en vitesse des atomes pulvérisés (thermalisés et énergétiques).
- La troisième séance abordera le couplage d'un plasma radiofréquence et d'un plasma microonde. Ce type de réacteur est utilisé pour synthétiser des films de type SiCN:H pour différents types d'applications : photovoltaïque, mécanique ... Le plasma sera caractérisé par spectroscopie optique d'émission et éventuellement par FTIR. Un film de type SiCN sera réalisé et contrôlé in situ par réflectométrie (mesure de l'épaisseur optique). Il sera ensuite analysé ex-situ par FTIR.

## Pré-requis

Les pré-requis à ce module sont les enseignements de physiques de bases des plasmas. UE 902 & 903 Physique fondamentales des plasmas (1) et (2), et UE 904 caractérisation des plasmas.

La langue utilisée sera a priori le français. Mais en fonction du public, l'enseignement pourra éventuellement se faire en anglais.

## Acquis d'apprentissage

A l'issue de cet enseignement, l'étudiant aura appréhendé la physique expérimentale des plasmas froids. Il aura manipulé sur différents types de réacteurs (DC, RF, micro-onde et PVD magnétron) largement utilisés en recherche dans le domaine des plasmas froids. Il aura également utilisé différents diagnostics plasmas tels que les sondes de Langmuir, la spectroscopie optique d'émission ou encore la fluorescence induite par laser. Ce module illustre les cours enseignés dans les pré-requis et présente à l'étudiant des outils expérimentaux actuels de recherche.

## Compétences visées

BC 2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2. Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité. BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.2 Maîtriser des techniques expérimentales les plus courantes du domaine.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 909 Physics and technology of fusion plasmas

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 50h,      Nombre de crédits ECTS : 6

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 50h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 909.1 Physics and technology of fusion plasmas	3000	50	75

## Descriptif

# English version below

L'objectif de cet enseignement est d'approfondir les notions nécessaires à la compréhension des phénomènes observés dans un plasma de fusion.

On approfondira notamment des modèles cinétiques, fluides, et Magnéto-Hydrodynamique (MHD), pour les appliquer à la géométrie et la phénoménologie des plasmas de fusion magnétique. En effet, la géométrie toroidale, les conditions aux bords, et les technologies environnantes modifient qualitativement la physique du plasma (l'équilibre, la forme des fluctuations électromagnétiques, les instabilités, la turbulence, le transport).

Une importante partie des recherches concernant la physique du bord des plasmas de fusion se fait à l'aide d'expériences de plasmas chauds confinés magnétiquement dans une enceinte cylindrique. La machine SPEKTRE à l'Institut Jean Lamour est conçue pour approcher les conditions d'un plasma de bord d'un réacteur de fusion magnétique. Une partie de cette UE (environ 20 heures) est dédiée à la physique de SPEKTRE.

Contenu :

1. Plasmas chauds magnétisés :
  - Rappels et approfondissements :
    - o Modes MHD idéaux (ondes d'Alfvén...)
    - o Théorie gyrocinétique
  - Chaos hamiltonien et théorie du contrôle du transport (facultatif)
  
2. Machines toroïdales de fusion :
  - Equilibre (Grad-Shafranov), surfaces magnétiques, axi-symmétrie et MHD réduite, principe énergétique et instabilités MHD (idéales et non-idéales)
  - Rappels et approfondissements sur les invariants du mouvement, et conséquences
  - Instabilités dues aux particules rapides
  - Mesures de fluctuations et analyse de transport
  - Contrôle du plasma : barrières de transport, stratégie de pilotage d'un réacteur
  - Transport néoclassique et impuretés

3. Machines cylindriques et SPEKTRE :
  - Bilan de matière et puissance (chauffage par ondes, pertes)
  - Ecoulements plasma
  - Contrôle
  - Instabilités d'interchange, Kelvin-Helmholtz
  - Modes et instabilités électromagnétiques (ex : hélicon, whistlers)
  - Gaines, gaines radiofréquences

The objective of this course is to deepen the notions necessary for understanding the phenomena observed in a fusion plasma. In particular, kinetic, fluid and Magneto-Hydrodynamic (MHD) models will be explored in order to apply them to the geometry and phenomenology of magnetic fusion plasmas. Indeed, the toroidal geometry, the boundary conditions, and the surrounding technologies qualitatively modify the plasma physics (equilibrium, shape of the electromagnetic fluctuations, instabilities, turbulence, transport). An important part of the research concerning edge physics of fusion plasmas is presented using experiments of hot plasmas magnetically confined in a cylindrical enclosure. The SPEKTRE device at Institut Jean Lamour is designed to approach the conditions of an edge plasma of a magnetic fusion reactor. Part of this teaching unit (about 20 hours) is dedicated to SPEKTRE physics.

Content :

1. Magnetized high temperature plasmas:

- Reminders and clarifications:
  - o Ideal MHD modes (Alfvén waves...)
  - o Gyrokinetic theory
- Hamiltonian chaos and transport control theory (optional)

2. Toroidal fusion machines:

- Equilibrium (Grad-Shafranov), magnetic surfaces, axi-symmetry and reduced MHD, energy principle and MHD instabilities (ideal and non-ideal)
- Reminders and insights on the invariants of movement, and consequences
- Instabilities due to fast particles
- Fluctuation measurements and transport analysis
- Plasma control: transport barriers, reactor control strategy
- Neoclassical transport and impurities

3. Cylindrical and SPEKTRE machines:

- Particles and power balance (Wave heating, losses)
- Plasma flows
- Control
- Interchange instabilities, Kelvin-Helmholtz
- Electromagnetic modes and instabilities (ex: helicon, whistlers)
- Sheaths, radiofrequency sheaths

## Pré-requis

Bases de la physique des plasmas

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant sera capable de décrire les principaux phénomènes observés dans les machines de plasmas chauds magnétisés.

## Compétences visées

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2. Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1 Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1 Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 910 Spécificité des décharges hors équilibre

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 50h,      Nombre de crédits ECTS : 6

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 50h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 910.1 Décharges électriques et liquides	3000	25	37,5
EC 910.2 Méthodes de diagnostic avancées	3000	25	37,5

## Descriptif

Décharges électriques et liquides

Introduction

Comportement des liquides diélectriques sous haute tension

Mécanismes de claquage

Streamers, sparks et arcs électriques

Ondes de choc, dynamique de bulles et cavitation

Interaction spark-parois et synthèse de nanoparticules

Décharges en contact avec les liquides      Electrical discharges and liquids

Introduction

Behaviour of dielectric liquids under high voltage stress

Breakdown mechanisms

Streamers, sparks and arcs

Shock waves, bubbles dynamics and cavitation

Spark-wall interaction and nanoparticle synthesis

Discharge in contact with liquids

Méthodes de diagnostics avancées

Mesures électriques (hautes tensions et impulsion HT très courtes)

Spectrométrie de masse

Diagnostics laser

Ombroscopie et Schlieren

Méthodes spectroscopiques avancées

Aspects pratiques : de la théorie à la réalité

Advanced diagnostics

Electrical measurements (high voltage and very short HV pulses)

Mass spectrometry  
Laser-based diagnostics  
Shadowgraphy and Schlieren  
Advanced spectroscopic methods  
Practical aspects: from theory to reality

## Pré-requis

Bases de la physique des plasmas - Basic plasma physics.  
UE 902 UE 903 (Physique fondamentale des plasmas 1 et 2 – Fundamentals of plasma physics 1 & 2)

## Acquis d'apprentissage

L'objectif de cette UE est d'aborder des spécificités des décharges hors équilibre. Il s'agit en particulier de découvrir les mécanismes mis en jeu lors de l'amorçage de décharge dans des liquides diélectriques et d'étudier l'interaction d'un plasma avec la surface d'un liquide, ainsi que les applications potentielles (synthèse de nanoparticules, médecine, traitement des effluents liquides, etc.).

Des méthodes de diagnostics particulièrement adaptées aux décharges hors équilibre complètent cet enseignement.

A l'issue de cette UE, les étudiants seront capables de décrire les principales caractéristiques des décharges dans les liquides, discipline assez nouvelle de la recherche en physique des plasmas. Les étudiants auront également une bonne connaissance de méthodes spécifiques de caractérisation des décharges hors équilibre (dont les décharges dans les liquides), en complément des méthodes abordées en UE 904

## Compétences visées

BC 2.1. Exploiter les savoirs pour résoudre des problèmes nouveaux :

- Mobiliser les savoirs fondamentaux du domaine et/ou à l'interface de plusieurs domaines
- Développer un esprit critique des savoirs,
- Résoudre des problèmes pour développer de nouveaux savoirs et de nouvelles procédures et intégrer les savoirs de différents domaines.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

- Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :
- Analyser un système complexe,
- Établir des liens entre des champs différents de la physique

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 901 Numerical methods and applications

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Hervé Rinnert herve.rinnert@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	TP	EqTD
EC 901.1 Numerical methods and applications	2800	15	15	37,5

## Descriptif

# English version below

Cette unité d'enseignement, commune aux masters MQN et PPEF, est consacrée aux méthodes de calcul numériques appliquées à des problèmes de physique en proximité avec les champs de recherche des matières condensées et diluées.

Ceux-ci impliquent souvent la résolution d'équations différentielles, des approches statistiques et de l'échantillonnage, nécessitant d'aborder des méthodes numériques spécifiques.

Une partie CM se concentre sur les notions théoriques, et ne nécessite pas l'utilisation d'un ordinateur. Une partie TP se déroule en grande partie sur machine, dans le langage python.

CM :

- Discrétisation, conditions aux bords
- Normalisation (adimensionnalisation)
- Procédure générale de développement d'un code de résolution numérique d'équations aux dérivées ordinaires (EDO) et partielles (EDP)
- Représentation d'un nombre en virgule flottante, et erreurs d'arrondis
- Analyse de schémas numériques (erreur numérique, convergence, stabilité numérique)

TP :

- Partie Monte-Carlo :
  - o Calcul de pi par échantillonnage simple, marche aléatoire
  - o Echantillonnage pondéré, oscillateur harmonique
  - o Chaîne de Markov, algorithme de Metropolis
  - o Applications à des modèles simples et au modèle d'Ising
  - o Convergence de la chaîne et calcul d'erreur
- Partie équations différentielles :
  - o Dérivées, intégrales
  - o Application aux EDO, méthode d'Euler



- o Interpolation
- o Application aux EDP, advection

This course, common to the MQN and PPEF masters, is devoted to numerical calculation methods applied to physics problems close to the fields of research of condensed and diluted matter. These often involve solving differential equations, statistical approaches and sampling, requiring specific numerical methods to be addressed. A part focuses on theoretical notions, and does not require the use of a computer. A practical part takes place using computers in the Python language.

CM:

- Discretization, boundary conditions - Normalization
- General procedure for developing a code for the numerical resolution of ordinary differential equations (ODE) and partial differential equations (PDE)
- Representation of a floating point number, and rounding errors
- Analysis of numerical schemes (numerical error, convergence, numerical stability)

Practicals:

- Monte Carlo:
  - o Calculation of pi by simple sampling, random walk
  - o Weighted sampling, harmonic oscillator
  - o Markov chain, Metropolis algorithm
  - o Applications to simple models and to the Ising model
  - o Chain convergence and error calculation
- Differential equations:
  - o Derivatives, integrals
  - o Application to ODEs, Euler method
  - o Interpolation
  - o Application to PDEs, advection

## Pré-requis

Développement de Taylor, bases de physique statistique, notions d'algorithme, bases de programmation en langage Python.

## Acquis d'apprentissage

Boîte à outils de méthodes numériques pour applications à la physique statistique et à la dynamique.

Procédures d'analyse de méthodes numériques.

## Compétences visées

BC 1. Usages avancés et spécialisés des outils numériques

- Identifier les principaux outils du domaine du numérique (architecture, langages, bibliothèques...),
- Se servir de façon autonome des outils numériques avancés pour un ou plusieurs métiers ou secteurs de recherche du domaine,
- Développer un algorithme adapté à un problème spécifique du domaine,

- Écrire un programme dans au moins un langage de programmation

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2. Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 903 Fundamentals of plasma physics 2

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 903.1 Décharge dans les gaz	3000	15	22,5
EC 903.2 Modélisation des plasmas chauds	3000	15	22,5

## Descriptif

# English version below

Cet enseignement constitue la deuxième partie du tronc commun. Il sera divisé en deux parties : la première traitant des décharges électriques dans les gaz la seconde des modèles utilisés en « plasmas chauds ».

Décharge dans les gaz :

Phénomènes élémentaires (coefficients de Townsend) et description d'une décharge continue : phénomène d'amorçage (loi de Paschen), structure spatiale d'une décharge diode. Décharge couronne d'arc.

Décharge radiofréquence et ses applications : couplage capacitif et inductif, tension d'auto-polarisation, applications aux dépôts et la gravure.

Décharge microonde : présentation des différents types avec ou sans champ magnétique.

Modélisation des plasmas chauds :

Etablissement des équations fluides à partir d'équations cinétiques, relation de fermeture.

Etablissement des équations de la magnéto hydrodynamique (MHD), ondes d'Alfven.

Amortissement Landau.

This course is the second part of "Fundamentals of plasma physics". It will be divided into two parts: The first dealing with electrical discharges in gases, the second with models used in "high temperature plasmas".

Gas discharge:

Elementary phenomena (Townsend coefficients) and description of a continuous discharge: ignition phenomenon (Paschen's law), spatial structure of a diode discharge. Corona arc discharge.

Radiofrequency discharge and its applications: capacitive and inductive coupling, self-polarization voltage, applications to deposition and etching.

Microwave discharge: Presentation of the different types with or without magnetic field.

Modeling of high temperature plasmas:  
Fluid equations derived from kinetic equations, closure relation. Magnetohydrodynamic (MHD) equations, Alfvén waves. Landau damping.

## Pré-requis

Physique des plasmas 1 : module 902

## Acquis d'apprentissage

À l'issue de ce cours, les étudiants devraient maîtriser les aspects théoriques des décharges plasmas utilisés dans les laboratoires de recherche et dans l'industrie.

Ils devraient également, grâce à la deuxième partie, maîtriser les différents niveaux de modélisation des plasmas chauds et leur domaine d'application.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1 Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 904 Plasma-surface interactions

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 904.1 Plasma-surface interactions	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

Cet enseignement développe les concepts de l'interaction plasma paroi pour l'étude de la physique des plasmas en contact avec une surface. Le but de cet enseignement est de fournir une première approche des phénomènes physiques de l'interaction plasma-surface, effets collisionnels, gaines, modélisation fluide et/ou cinétique, phénomènes d'ionisation, recombinaison, érosion, gravure).

1.      Gaines
  
2.      Equilibre d'ionisation dans un plasma (rappels de UE 903)
  - 2.1.    Section efficace d'ionisation
  - 2.2.    Taux et longueur d'ionisation
  - 2.3.    Equilibre d'ionisation
  
3.      Erosion de la paroi et (re)déposition
  - 3.1.    Phénomènes d'interaction plasma surface (Pulvérisation, gravure, dépôt ...)
  - 3.2.    Plasma Froid
    - 3.2.1. Pulvérisation magnétron
    - 3.2.2. Gravure RIE et profonde
  - 3.3.    Plasma chaud
    - 3.3.1. Choix des matériaux pour les composants face au plasma
    - 3.3.2. Redéposition prompte (présence d'un champ magnétique)
  
4.      Mécanismes de recyclage, temps de confinement
  - 4.1.    Recyclage
  - 4.2.    Temps de confinement, modèle d'Engelhardt
  - 4.3.    Bilan, recirculation des particules (modèle de réservoirs)

5. Modèle scrape-off-layer (facultatif)
  - profils radiaux
  - longueur caractéristique de décroissance de la densité et de la température

This course provides the basics of plasma wall interaction and presents a first approach to the physical phenomena of plasma-surface interaction, collisional effects, sheaths, fluid and/or kinetic modeling, ionization phenomena, recombination, erosion, etching.

1. Sheaths
2. Ionization equilibrium in a plasma (reminders of UE 903)
  - 2.1. Ionization cross section
  - 2.2. Rate and length of ionization
  - 2.3. Ionization balance
3. Wall erosion and (re)deposition
  - 3.1. Plasma surface interaction phenomena (sputtering, etching, deposition, etc.)
  - 3.2. Cold Plasma
    - 3.2.1. Magnetron sputtering
    - 3.2.2. RIE and deep etching
  - 3.3. High temperature plasma
    - 3.3.1. Choice of materials for plasma-facing components
    - 3.3.2. Prompt redeposition (presence of a magnetic field)
4. Recycling mechanisms, confinement time
  - 4.1. Recycling
  - 4.2. Confinement time, Engelhardt model
  - 4.3. Balance, particle recirculation (reservoir model)
5. Scrape-off-layer model (optional)
  - Radial profiles
  - Characteristic length of decrease of density and temperature

## Pré-requis

Modules 902 et 903.

Bases de la physique des plasmas - Basic plasma physics.

En fonction du public suivant l'UE, l'enseignement se fera en anglais ou en français.

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant devra être capable de décrire la physique de base des plasmas en contact avec une surface, et notamment la notion d'interaction plasma-paroi (flux de particules, pulvérisation, etc.). Il devra pouvoir expliquer le choix des matériaux faisant face au plasma dans un réacteur plasma.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 905 Caractérisation des plasmas, diagnostics

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 905.1 Diagnostics	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

Ce module traitera des diagnostics de base nécessaires à la caractérisation des plasmas. L'aspect théorique et l'aspect expérimental seront présentés pour chaque diagnostic.

Il sera divisé en deux parties :

- Les diagnostics permettant de caractériser les particules chargées (électrons, ions) seront présentés :
  - o Sonde de Langmuir : mesure de  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $f_{dee}$ ,  $V_p$ ,  $V_f$ .
  - o Théorie classique sans champ magnétique : Sonde simple et doubles sondes.
  - o présentation des problèmes liés à l'utilisation des sondes (haute pression, champ magnétique,...)
  - o Utilisation dans le cas de fluctuations des différents paramètres plasmas
    - o Interférométrie micro-onde ou optique : (mesure de  $n_e$ ) inversion tomographique (cas d'une symétrie de révolution)
    - o Diffusion Thomson (incohérente et cohérente), polarimétrie
    - o Réflectométrie classique (profils moyen de densité), mention de la réflectométrie comme diagnostic de la turbulence grâce aux phénomènes de diffusion tout au long de la propagation du faisceau
- L'étude des espèces neutres et des ions détectables par spectroscopie optique d'émission :
  - o Rappels généraux de physique atomique et moléculaire
  - o Spectre atomique, température d'excitation, élargissement de raies
  - o Spectre moléculaire, températures de vibrations et de rotations
  - o Applications particulières de la spectroscopie : titration NO pour la mesure de la concentration d'azote atomique, actinométrie (principes et limites)
  - o Emission beam spectroscopy

This course will deal with the basic diagnostics necessary for the characterization of plasmas. The theoretical and experimental aspects will be presented for each diagnostic.



It will be divided into two parts:

- Diagnostics allowing the characterization of charged particles (electrons, ions) will be presented: Langmuir probe: measurement of  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $f_{dee}$ ,  $V_p$ ,  $V_f$ .
  - o Classical theory without magnetic field: Single probe and double probes.
  - o Presentation of problems related to the use of probes (high pressure, magnetic field, etc.)
  - o Use in the case of fluctuations of the different plasma parameters

Microwave or optical interferometry: (measurement of  $n_e$ ) tomographic inversion (case of rotational symmetry)

Thomson scattering (incoherent and coherent), polarimetry

Classical reflectometry (mean density profiles), mention of reflectometry as a diagnostic of turbulence thanks to scattering phenomena throughout the propagation of the beam

- Study of neutral species and ions detectable by optical emission spectroscopy:
  - o General reminders of atomic and molecular physics
  - o Atomic spectrum, excitation temperature, line broadening
  - o Molecular spectrum, vibration and rotation temperatures
  - o Specific applications of spectroscopy: NO titration for measuring the concentration of atomic nitrogen, actinometry (principles and limits)
  - o Emission beam spectroscopy

## Pré-requis

UE 902, 903 : Bases de la physique des plasmas

UE 906 : Ondes et transferts de puissance

## Acquis d'apprentissage

L'objectif de cette UE est d'aborder différents diagnostics des plasmas utilisés aussi bien en plasmas chauds qu'en plasmas froids.

A l'issue de cette UE, les étudiants auront une bonne connaissance des diagnostics classiques utilisés pour l'étude et/ou le contrôle des procédés plasmas. Les aspects théoriques et pratiques seront abordés pour les différents diagnostics. Ce module devrait permettre à l'étudiant d'avoir les connaissances nécessaires pour la mise en œuvre et l'interprétation de mesures expérimentales.

## Compétences visées

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2 Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 906 Waves in plasmas - Heating

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 906.1 Waves in plasmas - Heating	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

Equations de Maxwell et établissement formel de l'équation d'onde dans un milieu diélectrique.

Obtention du tenseur diélectrique dans le cadre d'une modélisation fluide pour un plasma uniforme non-magnétisé puis magnétisé. Modes de propagation : photons et plasmons, ondes basse-fréquence. Notion de coupure et de résonance, vitesse de phase et de groupe.

Diagramme CMA pour les ondes en plasma magnétisé.

Tracé de rayon en milieu inhomogène.

Chauffage : Aspect thermodynamique, bilan. Puissance absorbée par un plasma collisionnel non-magnétisé, chauffage stochastique. Chauffage ohmique et sa limite pour l'application aux plasmas de fusion. Physique et technologie du chauffage par injection de neutres (chauffage collisionnel). Chauffage par onde, à fréquence cyclotronique électronique puis ionique : tenseur diélectrique obtenu par modélisation cinétique (plasma chaud), modélisation cinétique de l'absorption de puissance. Rôle de la polarisation de l'onde de chauffage. Le chauffage à résonance hybride basse pourra être abordée. Technologie de la production d'onde dans différentes gammes de fréquence.

Maxwell's equations and derivation of the wave equation in a dielectric medium. Deriving the dielectric tensor within the framework of a fluid modeling for a non-magnetized then magnetized uniform plasma. Modes of propagation: photons and plasmons, low-frequency waves. Notion of cut and resonance, phase and group velocities. CMA diagram for magnetized plasma waves. Ray tracing in an inhomogeneous medium.

Heating: Thermodynamic point of view, balance. Power absorbed by a non-magnetized collisional plasma, stochastic heating. Ohmic heating and its limit for application to fusion plasmas. Physics and technology of heating by neutral injection (collisional heating). Heating by wave, at electronic then ionic cyclotron frequency: dielectric tensor obtained by kinetic modeling (hot plasma), kinetic modeling of power absorption. Role of the polarization of the heating wave. Low hybrid resonance heating can be addressed. Wave generation technology in different frequency ranges

## Pré-requis

Electrodynamique classique, ondes électromagnétiques. Physique des plasmas 1.

## Acquis d'apprentissage

Equations d'onde dans un milieu diélectrique isotrope et anisotrope. Modes propres. Modélisation de la propagation en milieu inhomogène. Résonance et transfert de puissance. Notion de technologie de la production d'onde dans différentes gammes de fréquence. Modélisation d'un phénomène physique complexe.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1 Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction,

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 907 Transport, instabilities and turbulence

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 907.1 Transport, instabilities and turbulence	3000	30	45

## Descriptif

# English version below

1. Introduction : transport in discharge plasmas and fusion plasmas. Transport equations  
Transport processes in a plasma, S. I. Braginskii, Reviews of Plasma Physics, NY, Vol. 1, p. 205 (1965)
2. Diffusion in ionized gases  
Fick's law – Diffusion equation – Solving the diffusion equation – Diffusion across a magnetic field – Diffusion in fully ionized plasmas
3. Diffusion as a random walk  
The mean square distance travelled by a particle as a result of random collisions – The diffusion equation
4. Coulomb collisions and collisions with neutrals. Transport due to collisions
5. Transport due to electromagnetic perturbations
6. Instabilities : examples

1. Introduction : transport dans les plasmas de décharge et les plasmas de fusion.  
Équations de transport. Processus de transport dans un plasma, S. I. Braginskii, Reviews of Plasma Physics, NY, Vol. 1, p. 205 (1965)
2. Diffusion dans les gaz ionisés  
Loi de Fick – Équation de diffusion – Résolution de l'équation de diffusion – Diffusion à travers un champ magnétique – Diffusion dans des plasmas totalement ionisés
3. Diffusion - marche aléatoire  
Distance moyenne parcourue par une particule à la suite de collisions aléatoires - L'équation de diffusion
4. Collisions coulombiennes et collisions avec les neutres. Transport dû à des collisions
5. Transport dû aux perturbations électromagnétiques
6. Instabilités : exemples

## Pré-requis

Modules 902 et 903.

Bases de la physique des plasmas - Basic plasma physics.

En fonction du public suivant l'UE, l'enseignement se fera en anglais ou en français.

Teaching will be in English or French according to the audience attending the lectures.

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant devra être capable de comprendre pourquoi la notion de transport est intimement liée à la notion d'état d'équilibre du plasma. En fonction des paramètres du plasma, il sera également capable d'utiliser différents modèles permettant d'étudier les différents profils de densité et de température pouvant apparaître dans le plasma, en fonction des mécanismes de transport. Il pourra ainsi évaluer et estimer les coefficients de transport de matière et de chaleur dans un plasma. Enfin, il sera capable de décrire certaines instabilités pouvant être observées dans les plasmas.

## Compétences visées

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution.

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1. Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 909 Physics and technology of fusion plasmas

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 50h,      Nombre de crédits ECTS : 6

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 50h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 909.1 Physics and technology of fusion plasmas	3000	50	75

## Descriptif

# English version below

L'objectif de cet enseignement est d'approfondir les notions nécessaires à la compréhension des phénomènes observés dans un plasma de fusion.

On approfondira notamment des modèles cinétiques, fluides, et Magnéto-Hydrodynamique (MHD), pour les appliquer à la géométrie et la phénoménologie des plasmas de fusion magnétique. En effet, la géométrie toroidale, les conditions aux bords, et les technologies environnantes modifient qualitativement la physique du plasma (l'équilibre, la forme des fluctuations électromagnétiques, les instabilités, la turbulence, le transport).

Une importante partie des recherches concernant la physique du bord des plasmas de fusion se fait à l'aide d'expériences de plasmas chauds confinés magnétiquement dans une enceinte cylindrique. La machine SPEKTRE à l'Institut Jean Lamour est conçue pour approcher les conditions d'un plasma de bord d'un réacteur de fusion magnétique. Une partie de cette UE (environ 20 heures) est dédiée à la physique de SPEKTRE.

Contenu :

1. Plasmas chauds magnétisés :
  - Rappels et approfondissements :
    - o Modes MHD idéaux (ondes d'Alfvén...)
    - o Théorie gyrocinétique
  - Chaos hamiltonien et théorie du contrôle du transport (facultatif)
2. Machines toroïdales de fusion :
  - Equilibre (Grad-Shafranov), surfaces magnétiques, axi-symétrie et MHD réduite, principe énergétique et instabilités MHD (idéales et non-idéales)
  - Rappels et approfondissements sur les invariants du mouvement, et conséquences
  - Instabilités dues aux particules rapides
  - Mesures de fluctuations et analyse de transport
  - Contrôle du plasma : barrières de transport, stratégie de pilotage d'un réacteur
  - Transport néoclassique et impuretés

3. Machines cylindriques et SPEKTRE :
  - Bilan de matière et puissance (chauffage par ondes, pertes)
  - Ecoulements plasma
  - Contrôle
  - Instabilités d'interchange, Kelvin-Helmholtz
  - Modes et instabilités électromagnétiques (ex : hélicon, whistlers)
  - Gaines, gaines radiofréquences

The objective of this course is to deepen the notions necessary for understanding the phenomena observed in a fusion plasma. In particular, kinetic, fluid and Magneto-Hydrodynamic (MHD) models will be explored in order to apply them to the geometry and phenomenology of magnetic fusion plasmas. Indeed, the toroidal geometry, the boundary conditions, and the surrounding technologies qualitatively modify the plasma physics (equilibrium, shape of the electromagnetic fluctuations, instabilities, turbulence, transport). An important part of the research concerning edge physics of fusion plasmas is presented using experiments of hot plasmas magnetically confined in a cylindrical enclosure. The SPEKTRE device at Institut Jean Lamour is designed to approach the conditions of an edge plasma of a magnetic fusion reactor. Part of this teaching unit (about 20 hours) is dedicated to SPEKTRE physics.

Content :

1. Magnetized high temperature plasmas:

- Reminders and clarifications:
  - o Ideal MHD modes (Alfvén waves...)
  - o Gyrokinetic theory
- Hamiltonian chaos and transport control theory (optional)

2. Toroidal fusion machines:

- Equilibrium (Grad-Shafranov), magnetic surfaces, axi-symmetry and reduced MHD, energy principle and MHD instabilities (ideal and non-ideal)
- Reminders and insights on the invariants of movement, and consequences
- Instabilities due to fast particles
- Fluctuation measurements and transport analysis
- Plasma control: transport barriers, reactor control strategy
- Neoclassical transport and impurities

3. Cylindrical and SPEKTRE machines:

- Particles and power balance (Wave heating, losses)
- Plasma flows
- Control
- Interchange instabilities, Kelvin-Helmholtz
- Electromagnetic modes and instabilities (ex: helicon, whistlers)
- Sheaths, radiofrequency sheaths

## Pré-requis

Bases de la physique des plasmas

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant sera capable de décrire les principaux phénomènes observés dans les machines de plasmas chauds magnétisés.

## Compétences visées

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2. Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1 Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

BC6 : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

6.1 Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction.



**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 921 Formation en Langue Etrangère

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Stéphane Heuraux  
stephane.heuraux@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 45h,      Nombre de crédits ECTS : 6

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	TP	EqTD
EC 921.1 Français Langues étrangères (UE Ingénieur)	1100	45	45

## Descriptif

Cette UE est à destination des étudiants étrangers pour apprendre le français et les bases de

la culture française. Bases de la langue française orientée vers l'oral pratique orale du français de façon intensive pendant 2 semaines pour un apprentissage des rudiments du français courant pour la vie de tous les jours y compris les démarches administratives (oral et écrit) suivi d'un approfondissement de la pratique orale du français tout au long de l'année  
Speaking skills: there is a lot of room for conversation, as students also have self-study materials to acquire French speaking skills on a personal basis. By means of conversation and interaction new words and grammatical items are immediately put into practice. This will enable them to have short and simple conversations in everyday interaction between students.

Writing skills: the everyday language activities are also practised in writing. At the end of the course students can introduce themselves in writing, they can write a short invitation, etc. In short, they can also put into practice the acquired knowledge in writing.

Culture: elements of the French history, French way of life

## Pré-requis

Aucun-no

## Acquis d'apprentissage

Acquérir les connaissances fondamentales de base de la langue française This basic course helps students acquire a certain proficiency in french and it introduces the culture

## Compétences visées

Maîtriser de façon élémentaire la langue française parlé et écrit – French speaking and writing at basic level to be able to participate in a simple conversation: to ask and answer

simple questions on everyday subjects

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 922 Project Prague

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Stéphane Heuraux  
stephane.heuraux@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 70h,      Nombre de crédits ECTS : 6

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 70h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	PRJ	EqTD
EC 922.1 Project Prague	3000	70	

## Descriptif

The EMTRAIC is a training school to get practical experience with tokamak operation. The school is held on the COMPASS tokamak at the Institute of Plasma Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic (IPP Prague). The main goal is to acquaint participants with many aspects of experimental plasma physics on a tokamak:

- planning of experiments,
- participation in measurements,
- data processing,
- discussion of results within the experimental group,
- presentation of achieved results at the closing workshop,
- writing a report.

## Pré-requis

Basics in Plasma Physics and diagnostics.  
Course language: English.

## Acquis d'apprentissage

Students are assigned to different groups, which are supervised by experts from the Tokamak Department of the Institute of Plasma Physics. Each group consists of 1-2 students.

Tasks to be executed are formulated according current experimental program on the COMPASS tokamak. For example

- Energy balance in L mode at NBI heating,
- Analysis of sawtooth and ELMs instabilities by means of SXR diagnostics and the neutral particle analyzer,
- Electron and Ion temperatures at L mode with NBI, measured by Thomson scattering and by the neutral particle analyzer and interpreted by the DOUBLE code,
- Studies of Alfvén Eigenmodes and GAMs,
- Radial profiles of density and its fluctuations by several diagnostic tools,

- Probe measurements with vertical and horizontal manipulators,
- Runaway electrons studies.

### **Compétences visées**

The main goal is to acquaint participants with many aspects of experimental plasma physics on a tokamak.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 923 Practicum on WEST site at Cadarache

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Stéphane Heuraux  
stephane.heuraux@univ-lorraine.fr

Semestre : 9

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 6

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 923.1 Practicum on WEST site at Cadarache	3000	30	45

## Descriptif

Lieu : tokamak WEST à l'IRFM CEA-Cadarache, Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique. UE regroupant pendant 2 semaines à Cadarache de tous les étudiants du Master Erasmus Mundus Fusion-EP

Cours sur les technologies mises en oeuvre pour confiner, chauffer, diagnostiquer, simuler les plasmas de fusion, au travers d'études pratiques réalisées au sein de l'IRFM de CEA-Cadarache (2 sujets).

Sujets abordés :

Composants face au plasma : interaction plasma-paroi, conception des composants face au plasma, sollicitations thermo-mécaniques et électromagnétiques, retours d'expériences et problèmes actuels.

Supraconductivité : dimensionnement des systèmes magnétiques de tokamaks.

Diagnostics : mesures micro-ondes, réflectométrie, interférométrie, ECE, sondes et boucles magnétiques, neutronique.

Spectroscopie et mesures : visible / IR / X .

Technologie des chauffages : lignes de transmission de puissance, technologie et enjeux pour ITER, antennes de couplage au plasma, technologie de l'injection de neutres (sources, accélérateurs et faisceaux) .

Simulations numériques lourdes : turbulence gyrocinétique, modélisation intégrée.

Site: WEST tokamak at IRFM CEA-Cadarache, Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique. A 2-week course in Cadarache for all the students in the Erasmus Mundus Fusion-EP Master's programme

Course on the technologies implemented to confine, heat, diagnose and simulate fusion plasmas, through practical studies carried out at the IRFM of CEA-Cadarache (2 subjects).

Topics covered (practicum):

Plasma components: plasma-wall interaction, design of plasma components, thermo-mechanical and electromagnetic stresses, feedback and current problems.

Diagnostics: microwave measurements, reflectometry, interferometry, ECE, magnetic probes and loops, neutronics.

Spectroscopy and measurements: visible / IR / X .

Heating technology: power transmission lines, technology and challenges for ITER, plasma coupling antennas, neutral injection technology (sources, accelerators and beams) .  
Extensive numerical simulations: gyrokinetic turbulence, integrated modelling.

## Pré-requis

UEs du semestre 9.

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant sera capable d'appliquer certaines des notions théoriques apprises en cours d'année de façon concrète, au contact d'un tokamak, et des diagnostics qui l'entourent. En fonction du choix effectué par l'étudiant, il aura approfondi une ou plusieurs notions liées à la physique des plasmas de fusion, et aura côtoyé au plus près la recherche en cours sur les tokamaks.

The student will be able to apply some of the theoretical concepts learnt during the year in a practical way, in contact with a tokamak and the diagnostics that surround it. Depending on the choice made by the student, he or she will have studied one or more concepts related to the physics of fusion plasmas, and will have come into close contact with up-to-date tokamak research.

## Compétences visées

Bloc(s) de compétences associé(s) (selon fichier BCC\_ST\_Master physique) :

BC1 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques

- Identifier les principaux outils du domaine du numérique (architecture, langages, libraires,...),
- Se servir de façon autonome des outils numériques avancés pour un ou plusieurs métiers ou secteurs de recherche du domaine,
- Développer un algorithme adapté à un problème spécifique du domaine,
- Écrire un programme dans au moins un langage de programmation,

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux/

2.2 Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC3 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances

3.1. Identifier, sélectionner et analyser avec un esprit critique diverses ressources spécialisées pour documenter un sujet et synthétiser ces données en vue de leur exploitation,

3.2. Communiquer à des fins de formation ou de transfert de connaissances, par oral et par écrit, en Anglais et dans au moins une langue étrangère.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,

- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,
- 5.2. Devenir autonome dans son activité de recherche :
- S'appropriier le sujet avec l'objectif d'apporter des contributions personnelles (stage ou projet),
  - Conduire une analyse distanciée prenant en compte les enjeux et la complexité d'une problématique afin de proposer des solutions adaptées et/ou innovantes.

BC1: Advanced and specialized use of digital tools

- Identify the main digital tools (architecture, languages, libraries, etc.),
- Use advanced digital tools independently for one or more professions or research sectors in the field,
- Develop an algorithm adapted to a specific problem in the field,
- Write a code in at least one programming language,

BC2: Development and integration of fundamental knowledge/

2.2 Identify and carry out independently the different stages of an experimental or numerical approach :

- Interpret experimental or numerical data,
- Validate a theoretical model by comparing its predictions with experimental results and assessing its limits of validity.

BC3: Specialized communication for knowledge transfer

3.1 Identify, select and analyze with a critical mind various specialized resources to document a subject and synthesis of these data with a view to their exploitation,  
 3.2 Communicate for training or knowledge transfer purposes, orally and in writing, in English and at least one foreign language.

BC5: Developing a scientific approach to physics

5.1. Analyze an advanced problem and develop a solution strategy:

- Analyze a complex system (field of condensed matter or plasmas),
- Establish links between different fields of physics,
- Demonstrate creativity by developing a new solution strategy,

5.2. Become autonomous in your research activity:

- Take ownership of the subject with the aim of making personal contributions (internship or project),
- Carry out a distanced analysis that takes into account the issues and the complexity of a problem in order to propose appropriate and/or innovative solutions.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 1001 Culture scientifique et enjeux sociétaux

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Hervé Rinnert herve.rinnert@univ-lorraine.fr

Semestre : 10

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 1001.1 Culture scientifique et enjeux sociétaux	2800	30	45

## Descriptif

Cette unité d'enseignement, commune aux masters MQN et PPEF, est consacrée à la culture scientifique et aux enjeux sociétaux, en lien avec les deux parcours Matière Quantique et Nanomatériaux (MQN) et Physique des Plasmas et Energie de Fusion (PPEF).

- Sensibilisation à l'intelligence artificielle, ses utilisations en physique,
- Développement durable en lien avec les matériaux et l'énergie,
- Visite des laboratoires supports du master,
- Participation aux séminaires des laboratoires supports,
- Organisation de la journée scientifique du master.

## Pré-requis

Culture scientifique attendue au niveau M1.

## Acquis d'apprentissage

Les étudiants seront sensibilisés aux enjeux sociétaux et au développement durable, en lien avec les domaines de la physique, acquerront des notions sur l'intelligence artificielle, auront accès à l'écosystème local des laboratoires et du monde socio-économique.

## Compétences visées

BC3 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances

3.1. Identifier, sélectionner et analyser avec un esprit critique diverses ressources spécialisées pour documenter un sujet et synthétiser ces données en vue de leur exploitation,

3.2. Communiquer à des fins de formation ou de transfert de connaissances, par oral et par écrit, en français et dans au moins une langue étrangère.



BC4 : Appui à la transformation en contexte professionnel

4.2. Développer une attitude professionnelle et responsable :

- Analyser ses actions en situation professionnelle, s'auto-évaluer pour améliorer sa pratique dans le cadre d'une démarche qualité,
- Respecter les principes d'éthique, de déontologie et de responsabilité environnementale.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 1004 Stage SFP

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 10

Volume horaire enseigné : 0h,      Nombre de crédits ECTS : 24

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 0h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	EqTD	EC 1004.1 Stage SFP
------------------------------	-----	------	------------------------------

## Descriptif

Le stage constitue une situation intégratrice majeure du master qui permettra aux étudiants de mener une activité de recherche dans une équipe de recherche, qu'elle soit d'un des laboratoires supports du master ou d'un autre laboratoire, en accord avec le responsable pédagogique du parcours-type.

## Pré-requis

Socle de connaissances du master de physique, M1 et M2, S9.

## Acquis d'apprentissage

Connaissance du fonctionnement d'une équipe de recherche. Implication dans une démarche scientifique.

## Compétences visées

BC 1. : Usages avancés et spécialisés des outils numériques

- Identifier les principaux outils du domaine du numérique (architecture, langages, libraires...),

- Se servir de façon autonome des outils numériques avancés pour un ou plusieurs métiers ou secteurs de recherche du domaine,

- Développer un algorithme adapté à un problème spécifique du domaine,

- Écrire un programme dans au moins un langage de programmation

BC 2. : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

BC 2.2. : Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,

- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats,

expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC 3. : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances

BC 3.1. : Identifier, sélectionner et analyser avec un esprit critique diverses ressources spécialisées pour documenter un sujet et synthétiser ces données en vue de leur exploitation

BC 3.2. : Communiquer à des fins de formation ou de transfert de connaissances, par oral et par écrit, en français et dans au moins une langue étrangère. Conduire un projet

(conception, pilotage, coordination d'équipe, mise en œuvre et gestion, évaluation, diffusion) pouvant mobiliser des compétences pluridisciplinaires dans un cadre collaboratif,

BC 4. : Appui à la transformation en contexte professionnel

BC 4.1. : Conduire un projet (conception, pilotage, coordination d'équipe, mise en œuvre et gestion, évaluation, diffusion) pouvant mobiliser des compétences pluridisciplinaires dans un cadre collaboratif.

BC 5. : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

BC 5.1. : Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),

- Établir des liens entre des champs différents de la physique,

- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution

BC 6. : Mise en œuvre de méthodes et d'outils du champ disciplinaire

BC 6.1. : Maîtriser les outils mathématiques utiles en physique et résoudre des problèmes à haut niveau d'abstraction

BC 6.2. : Maîtriser des techniques expérimentales les plus courantes du domaine.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 1002 Tokamak : dimensionnement et outils d'analyse

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 10

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 1002.1 Tokamak : dimensionnement et outils d'analyse	3000	30	45

## Descriptif

Dimensionnement tokamak :

Cours sur la définition et le dimensionnement d'un tokamak. Lieu : tokamak WEST à l'IRFM CEA-Cadarache, Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique. UE regroupant pendant 2 semaines à Cadarache les étudiants des M2 PPF et GI (Paris) et M2 PPEF (Marseille, Nancy). Si ce regroupement n'est pas possible, l'enseignement aura lieu à Nancy.

Cours sur les technologies mises en oeuvre pour confiner, chauffer, diagnostiquer, simuler les plasmas de fusion, au travers d'études pratiques réalisées au sein de l'IRFM de CEA-Cadarache.

Sujets abordés :

Composants face au plasma : interaction plasma-paroi, conception des composants face au plasma, sollicitations thermo-mécaniques et électromagnétiques, retours d'expériences et problèmes actuels.

Supraconductivité : dimensionnement des systèmes magnétiques de tokamaks.

Diagnostics : mesures micro-ondes, réflectométrie, interférométrie, ECE, sondes et boucles magnétiques, neutronique.

Spectroscopie et mesures : visible / IR / X .

Technologie des chauffages : lignes de transmission de puissance, technologie et enjeux pour ITER, antennes de couplage au plasma, technologie de l'injection de neutres (sources, accélérateurs et faisceaux) .

Simulations numériques lourdes : turbulence gyrocinétique, modélisation intégrée.

## Pré-requis

UEs du semestre 9.

## Acquis d'apprentissage

L'étudiant sera capable d'appliquer certaines des notions théoriques apprises en cours d'année de façon concrète, au contact d'un tokamak, et des diagnostics qui l'entourent. En

fonction du choix effectué par l'étudiant, il aura approfondi une ou plusieurs notions liées à la physique des plasmas de fusion, et aura côtoyé au plus près la recherche en cours sur les tokamaks.

## Compétences visées

BC1 : Usages avancés et spécialisés des outils numériques

- Identifier les principaux outils du domaine du numérique (architecture, langages, librairies),
- Se servir de façon autonome des outils numériques avancés pour un ou plusieurs métiers ou secteurs de recherche du domaine,
- Développer un algorithme adapté à un problème spécifique du domaine,
- Écrire un programme dans au moins un langage de programmation,

BC2 : Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.2. Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC3 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances

3.1. Identifier, sélectionner et analyser avec un esprit critique diverses ressources spécialisées pour documenter un sujet et synthétiser ces données en vue de leur exploitation,

3.2. Communiquer à des fins de formation ou de transfert de connaissances, par oral et par écrit, en français et dans au moins une langue étrangère.

BC5 : Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe (domaine de la matière condensée ou des plasmas),
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution,

5.2. Devenir autonome dans son activité de recherche :

- S'approprier le sujet avec l'objectif d'apporter des contributions personnelles (stage ou projet),
- Conduire une analyse distanciée prenant en compte les enjeux et la complexité d'une problématique afin de proposer des solutions adaptées et/ou innovantes.

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 1003 Décharges et applications

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Etienne Gravier  
etienne.gravier@univ-lorraine.fr

Semestre : 10

Volume horaire enseigné : 30h,      Nombre de crédits ECTS : 3

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 30h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	CM	EqTD
EC 1003.1 Décharges et applications	3000	30	45

## Descriptif

Cette UE est constituée d'un cours magistral (15h) et chaque étudiant (ou chaque binôme d'étudiants selon l'effectif d'étudiants) devra réaliser un projet (15h) portant sur un sujet de recherche actuellement mené au sein du laboratoire.

Dépôt physique en phase vapeur (PVD)  
Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PACVD)  
Gravure plasma  
Plasmas électrolytiques et applications  
Traitements thermochimiques assistés par plasma  
Phénomènes aux surfaces  
Projets tutorés  
    Physical vapour deposition (PVD)  
Plasma assisted chemical vapour deposition (PACVD)  
Plasma etching  
Plasma electrolysis and their applications  
Plasma assisted thermochemical treatments

Phenomena at surfaces  
Tutored projects

## Pré-requis

- Bases de la physique des plasmas - Basic plasma physics.
- UE 902 UE 903 (Physique fondamentale des plasmas 1 et 2 – Fundamentals of plasma physics 1 & 2)
- UE 904 (interactions plasmas – surfaces – Plasma surface interactions)

## Acquis d'apprentissage

L'objectif de cette UE est d'aborder des aspects applicatifs des plasmas hors équilibre très souvent rencontrés dans de nombreux secteurs industriels (transports, énergie, industries manufacturières, etc.).

A l'issue de cette UE, les étudiants auront une bonne connaissance des différents procédés de traitement des surfaces par plasma d'un point de vue théorique mais également d'un point de vue appliqué.

A travers des projets tutorés, les étudiants seront confrontés à la réalité d'un sujet de recherche d'actualité et acquerront ainsi une méthodologie et des pratiques de chercheur.

## Compétences visées

BC 2. Développement et intégration de savoirs fondamentaux

2.1. Exploiter les savoirs pour résoudre des problèmes nouveaux :

- Mobiliser les savoirs fondamentaux du domaine et/ou à l'interface de plusieurs domaines,
- Développer un esprit critique des savoirs.
- Résoudre des problèmes pour développer de nouveaux savoirs et de nouvelles procédures et intégrer les savoirs de différents domaines.

2.2. Identifier et mener en autonomie les différentes étapes d'une démarche expérimentale ou numérique :

- Interpréter des données expérimentales ou numériques,
- Valider un modèle théorique par comparaison de ses prévisions aux résultats, expérimentaux et apprécier ses limites de validité.

BC 3 : Communication spécialisée pour le transfert de connaissances

3.1. Identifier, sélectionner et analyser avec un esprit critique diverses ressources

spécialisées pour documenter un sujet et synthétiser ces données en vue de leur exploitation

BC 5. Élaboration d'une démarche scientifique en physique

5.1. Analyser un problème avancé et développer une stratégie de résolution :

- Analyser un système complexe,
- Établir des liens entre des champs différents de la physique,
- Faire preuve de créativité en développant une nouvelle stratégie de résolution

**Mention et/ou parcours dont relève cette UE :** ST\_M\_Physique

**Code Apogee de l'UE :**

**Nom complet de l'UE :** UE 1021 Master Thesis Dissertation Fusion E.P.

Composante de rattachement : FA0 - FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Nom du responsable de l'UE et adresse électronique : Hervé Rinnert herve.rinnert@univ-lorraine.fr

Semestre : 10

Volume horaire enseigné : 0h,      Nombre de crédits ECTS : 30

Volume horaire travail personnel de l'étudiant : 0h

Langue d'enseignement de l'UE : Français

Enseignements composant l'UE	CNU	EqTD	EC 1021.1 Master Thesis Disserta tion Fusion E.P.
------------------------------	-----	------	--

## Descriptif

-

## Pré-requis

-

## Acquis d'apprentissage

-

## Compétences visées

-