

**Structure du programme et liste des cours****Physique numérique du solide****(Cheminement: 3)**

À moins d'indication contraire, un cours comporte trois (3) crédits

**Cours obligatoires (60 crédits)****ASP1001 - Introduction à l'astrophysique**

Ce cours s'adresse aux étudiants de physique et à tous les étudiants intéressés ayant au moins un DEC en sciences de la nature. Mouvements réels et apparents de lune, des planètes et des étoiles; systèmes géocentrique et héliocentrique, lois de Kepler, systèmes de coordonnées. Télescope, défauts, limite de résolution, spectres et spectrographe. Structure du soleil, lois de radiation, propriétés, classification et évolution des étoiles, étoiles doubles et variables. Objets compacts: naines blanches, pulsars et trous noirs. Amas stellaires, galaxies et quasars. Étalons de distance et cosmologie.

**GEI1002 - Electricité fondamentale I**

Acquérir des connaissances fondamentales sur l'électrostatique, l'électrocinétique, la magnétostatique, le formalisme mathématique et les outils informatiques appropriés.

Electrostatique : Loi de Coulomb, potentiel électrique, énergie électrique, théorème de Gauss et applications, capacité électrique, les diélectriques, particules chargées dans un champ électrique. Electrocinétique : le courant électrique, densité de courant et conductivité, forme locale de la Loi d'Ohm, énergie électrocinétique. Equations des champs. Equations de Laplace et de Poisson : solutions analytiques et numériques, outils informatiques. Magnétostatique : force magnétique, champ d'induction magnétique, potentiel vecteur, théorème d'Ampère, potentiel magnétique du champ, travail des forces magnétiques, forces et flux magnétique, champ magnétique dans la matière.

**GEI1040 - Instrumentation et mesure**

Principes généraux des mesures électriques : vocabulaire de l'électricité; système métrique; calcul d'incertitude; sécurité au laboratoire. Définition et caractérisation des signaux électriques : signal continu, signal alternatif, valeur moyenne, valeur crête, valeur efficace, période. Instrument de mesure : multimètre, voltmètre, ampèremètre, oscilloscope. Distinction entre mesure en courant continu et mesure en courant alternatif. Etude approfondie de l'oscilloscope : utilisation des curseurs d'amplitude et de temps, mesure de phase, mesure de valeurs moyenne et efficace, capture de signaux, mesures en transitoire.

LabVIEW : programmation graphique (langage G), concept d'instrument virtuel : face avant, diagramme bloc, icône, création de VIs et de sous-VIs, structure, boucles et conditions, chaînes, tableaux, clusters, graphes déroulants. Acquisition de données dans LabVIEW : principes fondamentaux et contrôle d'instruments.

**ING1057 - Thermodynamique appliquée I**

Comprendre les transformations de l'énergie dans des systèmes en équilibre. Énoncer, expliquer et appliquer les quatre principes de la thermodynamique aux substances, aux machines et aux systèmes en général.

Température. Pression. Énergie. Travail. Concept d'énergie interne. Procédés sans écoulement et avec écoulement. Première loi de la thermodynamique. Concept du procédé réversible. Le procédé irréversible. Propriétés thermiques des gaz. Concept d'enthalpie. Chaleur spécifique. Deuxième principe de

la thermodynamique. Cycle de Carnot. Entropie. Fonctions thermodynamiques des substances pures. Applications de la thermodynamique à divers systèmes. Détente Joule-Thompson. Compresseurs. Machines thermiques. Réfrigération.

### **MAP1006 - Mathématiques appliquées I**

Transmettre à l'étudiant les bases de l'algèbre matricielle, l'introduire aux méthodes numériques, lui donner les outils nécessaires à la résolution des équations différentielles ordinaires et lui montrer certaines applications des équations différentielles. Algèbre matricielle : matrices, définitions et opérations, matrice triangulaire, diagonale, transposée d'une matrice, matrice régulière et rang, déterminants, inverse d'une matrice, solution d'équations linéaires, valeurs et vecteurs propres. Nombres complexes. Équations différentielles : classification, solution d'une équation différentielle avec interprétation géométrique; équations différentielles du premier ordre, équations exactes et facteur intégrant, équations à variables séparables, homogènes, linéaires, de Bernoulli; applications (trajectoires orthogonales, problèmes de taux, etc.). Équations différentielles d'ordre supérieur : système fondamental de solutions, équations linéaires, homogènes à coefficients constants, réduction d'ordre, équations linéaires non-homogènes, équations d'Euler-Cauchy; résolution en séries de puissances; applications. Systèmes d'équations différentielles homogènes et non homogènes.

### **MAP1007 - Mathématiques appliquées II**

Acquisition de notions fondamentales sur les fonctions à plusieurs variables, les courbes et les surfaces dans le plan et l'espace. Applications du calcul différentiel et intégral à plusieurs variables ainsi que le calcul vectoriel.

Éléments de géométrie analytique. Courbes planes, tangentes et longueur d'arc, coordonnées polaires, intégrales en coordonnées polaires, équations polaires des coniques. Vecteurs de dimension deux et trois, produit scalaire, produit vectoriel, droites et plans, surfaces. Fonctions vectorielles et courbes dans l'espace, limites, dérivées et intégrales, cinématique, courbure, composantes tangentielle et normale de l'accélération, lois de Kepler. Fonctions de plusieurs variables, limites et continuité, dérivées partielles, accroissement et différentielle, dérivation de fonctions composées, dérivées directionnelles, normales et plans tangents, valeurs extrêmes de fonctions à plusieurs variables, multiplicateurs de Lagrange. Intégrales doubles, aire et volume, intégrales doubles en coordonnées polaires, aires de surfaces, intégrales triples, moment d'inertie et centre de masse, coordonnées cylindriques, coordonnées sphériques, changement de variables et jacobiens. Champs vectoriels, intégrales curvilignes, indépendance du chemin, théorème de Green-Riemann, intégrales de surface, théorème de flux-divergence, théorème de Stokes.

### **MAP1008 - Mathématiques appliquées III**

Application du calcul des transformées, des nombres complexes et des variables complexes.

Séries de Fourier : applications aux problèmes, aux limites des équations aux dérivées partielles. Fonction d'une variable complexe : théorèmes de Cauchy. Calcul des résidus. Transformation de Laplace : calcul des transformées de Laplace. Applications aux équations différentielles ordinaires.

### **PHQ1005 - Mécanique classique I**

Se familiariser avec les concepts de base de la mécanique classique, et faire l'apprentissage de l'utilisation et de la solution d'équations différentielles dans le contexte d'un problème physique.

Introduction générale et situation de la mécanique à l'intérieur de la physique. Cinématique et dynamique d'une particule : calcul vectoriel, première et seconde lois de Newton, oscillateur harmonique; énergie, torque et moment cinétique. Système de plusieurs particules : troisième loi de Newton, contraintes. Force gravitationnelle. Formulation lagrangienne de la mécanique et principe de Hamilton.

### **PHQ1014 - Physique statistique**

Appliquer la théorie moléculaire à l'étude des systèmes thermodynamiques.

Théorie cinétique des gaz; distribution des vitesses moléculaires; l'ordinateur appliqué à la dynamique moléculaire. Statistique de Maxwell-Boltzmann et applications. Statistique de Bose-Einstein et de Fermi-Dirac; applications. Ensembles de Gibbs; méthode Monte-Carlo. Fluctuations, mouvement brownien. Chaleur spécifique : théories d'Einstein et Debye.

### **PHQ1019 - Physique mathématique**

Compléter l'acquisition des outils mathématiques indispensables et les utiliser pour la solution de problèmes physiques.

Compléments de variables complexes: théorème de Cauchy, série de Taylor, série de Laurent, calcul de résidus; applications. Espaces vectoriels de dimension infinie: produit scalaire, convergence, espace de Hilbert, opérateurs, décomposition spectrale; applications en mécanique quantique. Équations aux dérivées partielles: conditions aux limites, variables séparables; quelques problèmes classiques de la physique mathématique.

### **PHQ1023 - Mécanique classique II**

Résoudre par des méthodes numériques et formelles, des problèmes typiques de dynamique.

Solution à l'aide d'ordinateur des équations de Newton et des équations de Lagrange. Dynamique du corps rigide. Petites oscillations. Équations de Hamilton et formalisme de Hamilton-Jacobi. Problèmes élémentaires de chaos.

### **PHQ1026 - Physique expérimentale II**

Approfondir les concepts et techniques abordés dans le cours PHQ1025 Physique expérimentale I. Développer des techniques expérimentales plus avancées, plus particulièrement celles qui utilisent l'ordinateur pour obtenir et traiter des données, et pour contrôler le déroulement d'une expérience.

Applications tirées des domaines de la mécanique, de l'optique, de l'électromagnétisme, de la thermodynamique et de la physique moderne.

### **PHQ1027 - Physique expérimentale III**

Se familiariser avec certaines des techniques expérimentales et méthodes de traitement de données avancées de la physique, utilisées couramment en recherche et développement. Évaluer les limites de précision d'un montage complexe dans lequel on retrouve plusieurs appareils.

Expériences choisies dans les domaines de l'optique physique et non linéaire, de la physique atomique et moléculaire, de la physique de l'état solide et de la physique nucléaire.

### **PHQ1044 - Électromagnétisme**

Acquérir les concepts physiques nécessaires à la compréhension des phénomènes temporels en électromagnétisme et se familiariser avec le formalisme mathématique requis.

Solution des équations de Maxwell. Champ électromagnétique dépendant du temps : relations constitutives; puissance et énergie. L'équation d'onde et ses solutions. Propagation des ondes dans les milieux infinis. Réflexion et transmission à une interface. Propagation des ondes dans certaines structures : ligne de transmission, guide d'ondes et fibre optique. Résonance et cavité micro-onde. Introduction à la théorie des antennes.

### **PHQ1047 - Programmation scientifique en Python**

Ce cours vise à intégrer les notions de base de la programmation orientée objet à l'aide du langage Python dans la résolution de problèmes en sciences pures. L'objectif est, d'une part, d'apprendre à manipuler des données et produire des graphiques scientifiques, et d'autre part, d'apprendre la structure d'un programme scientifique dans le but de solutionner des problèmes posés en sciences pures.

### **PHQ1048 - Ondes et vibrations**

Oscillateur harmonique libre, amorti et forcé. Résonance. Phaseurs. Ondes stationnaires. Oscillateurs couplés et modes propres d'un système à plusieurs degrés de liberté. Ondes progressives, relation de dispersion, paquet d'ondes, vitesse de phase et de groupe. Impédance, réflexion, transmission et réfraction des ondes. Battement, interférence et diffraction. Transformées de Fourier. Solutions à l'équation d'onde en deux et trois dimensions.

### **PMO1008 - Mécanique quantique II**

Approfondir les méthodes numériques et formelles de la mécanique quantique. Spin et addition de moments cinétiques. Solution, à l'aide de l'ordinateur, de l'équation aux valeurs propres pour l'hamiltonien. Modèle atomique du champ central, champ self-consistent. Méthodes d'approximation: perturbations stationnaires, perturbations dépendant du temps, méthode variationnelle. États stationnaires de diffusion.

## **PMO1010 - Mécanique quantique I**

Se familiariser avec le formalisme et les problèmes élémentaires de la mécanique quantique.

Espaces vectoriels de dimension finie. Systèmes quantiques dont l'espace d'état a une dimension finie : vecteur d'état, grandeurs physiques, opérateurs, équation de Schrödinger et équation aux valeurs propres pour l'hamiltonien. Particule en une dimension spatiale : spectre discret et spectre continu; puits et barrières carrés, oscillateur harmonique. Particule en trois dimensions spatiales : moment cinétique, potentiel sphériquement symétrique, potentiel en  $1/r$ . Principe d'incertitude et interprétation de la mécanique quantique.

## **PMO1013 - Physique de l'état solide**

Comprendre les concepts fondamentaux et les méthodes de base de la physique de l'état solide.

Théorie classique des propriétés métalliques: modèle de Drude. Gaz d'électrons libres de Fermi. Structure cristalline. Diffraction cristalline et réseau réciproque: équations de Laue. Bandes d'énergie: théorème de Bloch. La liaison cristalline. Phonons et vibrations du réseau. Propriétés thermiques des isolants: modèle de Debye.

## **PMO1017 - Relativité et physique moderne**

Théorie de la relativité restreinte. L'expérience de Michelson-Morley. Les transformations de Lorentz et leurs conséquences. Bases expérimentales de la physique quantique. Dualité onde-particule de la matière et de la lumière. Principe d'incertitude d'Heisenberg. Structure de l'atome. Équation de Schrödinger. Solutions pour des potentiels simples. Quantification de l'énergie. Particules élémentaires et physique nucléaire.

## **Cours optionnels (21 crédits)**

L'étudiant suit quinze à vingt et un crédits (15 à 21 crédits) de cours optionnels parmi la liste suivante :

### **IAR1001 - Intelligence artificielle**

L'objectif principal de ce cours est d'apprendre les concepts de base de l'intelligence artificielle (IA) et, en particulier, ses aspects informatiques et mathématiques. L'étudiant devra être en mesure d'identifier les problèmes qui relèvent de l'IA, de sélectionner les techniques ou approches pertinentes et de les mettre en application de façon efficace. Les techniques de représentation des connaissances (structures de données) et de recherche (algorithmes), ainsi que leur réalisation informatique, de même que certains domaines d'application, constituent la matière fondamentale de ce cours. Plus spécifiquement, la matière sera présentée principalement dans la perspective des agents intelligents, et, de façon complémentaire, dans le contexte des systèmes multiagents et de l'intelligence artificielle distribuée.

Le cours fait le tour des aspects d'actualité de l'intelligence artificielle. Les agents "intelligents" servent de vecteur pour promouvoir l'explication des autres concepts de l'IA. Parmi ces concepts, nous voyons : les méthodes et stratégies de recherches de solution, les méthodes de jeux, la connaissance et le raisonnement fondés sur la logique du premier ordre et les inférences en logique du premier ordre, la planification et l'action logique et, enfin, le raisonnement probabiliste avec des connaissances incertaines. Dans une deuxième partie, nous introduisons la notion d'apprentissage automatique au moyen des réseaux de neurones et le traitement des langues naturelles.

### **INF1004 - Structures de données et algorithmes**

Permettre à l'étudiant de se familiariser avec les structures de données classiques et les algorithmes qui leur sont associés; réaliser des implantations statiques et dynamiques de ces structures : faire l'évaluation de la complexité spatiale et temporelle dans les cas simples; étudier la récursion et la comparer avec l'itération.

Revue des concepts élémentaires de programmation; bases de la programmation Objet: encapsulation, dissimulation de l'information; séparation du comportement et de l'implantation; héritage et polymorphisme; conception par héritage et par composition; utilisation de fichiers; les principales structures de données: liste, pile, file, table d'adressage dispersé, arbre, graphe; implantation statique et dynamique; les algorithmes de fouille, de tri, les fonctions de hachage et les stratégies de traitement des collisions, parcours d'arbres et de graphes; le concept de récursion : les fonctions mathématiques récursives; comparaison avec les fonctions itératives correspondantes; implantation de récursion à l'aide de piles; analyse élémentaire de la complexité des algorithmes: complexité spatiale et complexité temporelle; notation "grand O", comportement du meilleur cas, du cas

moyen et du pire cas; principales classes de complexité d'algorithmes; stratégies de test pour les classes et les applications.

Ce cours utilise le langage de programmation Java et la plateforme Eclipse.

### **PHQ6003 - Physique statistique avancée**

Approfondir la compréhension de la physique statistique et l'utiliser dans des applications modernes. Les sujets traités seront choisis parmi les suivants : fondements de la physique statistique : ensembles et fluctuations. Transitions de phase : transitions du premier et du deuxième ordre, approche du champ moyen, notion d'universalité et groupe de renormalisation. Modèles de Ising et de Potts. Physique statistique hors d'équilibre. Théorie cinétique des gaz. Hiérarchie BBGKY. Équation de Boltzmann. Diffusion. Propriétés de transport. Méthode de théorie des champs en physique statistique.

### **PMO1014 - Mécanique des fluides**

Résoudre des problèmes de mécanique des fluides au moyen de différentes techniques : équations aux dérivées partielles, méthodes numériques, analyse dimensionnelle.

Obtention des équations de conservation (formes différentielle et intégrale), approches lagrangienne et eulérienne. Fluide idéal. Équations d'Euler et de Bernoulli, écoulements potentiel et incompressible, ondes. Fluides visqueux, fluides newtoniens et équation de Navier-Stokes, écoulements laminaires et turbulence. Différences finies et volumes finis, utilisation de logiciels courants.

### **PMO6002 - Mécanique quantique avancée**

Approfondir la compréhension du formalisme de la mécanique quantique et l'utiliser dans des applications modernes. Les sujets traités seront typiquement choisis parmi les suivants: équation de Dirac, intégrale fonctionnelle, seconde quantification, symétrie des atomes, des molécules et des cristaux; méthode de Hartree-Fock et fonctionnelle de densité, optique quantique, informatique quantique et décohérence.

### **PMO6011 - Méthodes de simulation numérique en sciences des matériaux**

Initier les étudiant(es) à l'utilisation de méthodes de simulations avancées dans le cadre de la science des matériaux. Probabilités et statistiques, Physique statistique. Analyse d'erreur. Méthodes numériques de base. Simulations Monte Carlo. Simulations de dynamique moléculaire. Corrections quantiques. Monte Carlo quantique. Simulations de chimie quantique. DFT quantique et dynamique moléculaire quantique.

### **PRO1027 - Programmation scientifique en C**

Approfondir les concepts fondamentaux de la conception et de la production de logiciel. Développer l'habileté à réaliser des logiciels de qualité. Réaliser des applications pratiques dans le domaine des méthodes numériques.

Étude des langages C et C++. Qualité des programmes : clarté, lisibilité, modifiabilité, efficacité, facilité d'usage, robustesse. Programmation modulaire. Programmation en langage C ou C++. A titre indicatif, les applications sont choisies parmi les suivantes : statistiques, manipulation de matrices, résolution de systèmes d'équations linéaires, interpolation, approximation, dérivation et intégration numériques.

L'étudiant suit de zéro à six crédits (0 à 6 crédits) de cours optionnels parmi la liste suivante :

### **ALG1001 - Logiques et Ensembles**

S'initier aux concepts de base des mathématiques actuelles à travers l'étude de concepts de la logique et de la théorie des ensembles. Développer la capacité de faire des preuves.

Logique propositionnelle : formes propositionnelles et connecteurs logiques, dérivations et méthodes de preuves. Logique des prédicats : quantificateurs et raisonnements avec ceux-ci. Concepts ensemblistes : approche intuitive et approche axiomatique des ensembles, axiome des naturels et preuve par induction mathématique. Relations, relations d'ordre, relations d'équivalence. Fonctions et applications.

### **ASP1002 - Astrophysique**

Approfondir l'étude de la structure et des conditions de stabilité et d'évolution des étoiles. Faire le lien entre ce que les outils d'observation

peuvent mesurer et ce dont les modèles mathématiques, basés sur la physique contemporaine, ont besoin pour pouvoir décrire adéquatement les phénomènes.

Survol des connaissances et des problèmes principaux de l'astrophysique contemporaine. Les étoiles et leur rayonnement: description et classification, valeur des paramètres physiques (masse, rayon, densité, classe spectrale, etc.). Structure et évolution des étoiles: atmosphères et intérieurs, sources d'énergie, équilibres hydrodynamique et thermodynamique; équations pertinentes. Étoiles variables: genre d'instabilités, conditions temporaires. Autres sources irrégulières: quasars, sources X, etc. Structure de l'univers: théories, paramètres mesurables, genre de matière et particules fondamentales, modèles d'évolution; situation actuelle des connaissances.

### **CHM1009 - Stage en milieu de travail**

Acquérir une expérience professionnelle reliée à sa formation en effectuant un stage de travail de nature professionnelle en milieu industriel ou dans un lieu de recherche universitaire ou autre. Avec l'aide du responsable de stage, l'étudiant se trouve un lieu de stage pertinent à sa formation dans les domaines soit de la chimie, de la biochimie, des biotechnologies ou de la physique. Le stage se déroule sous la supervision académique du professeur responsable du cours et, en milieu de travail, sous celle d'un tuteur désigné.

Le stage est préférablement réalisé à plein temps au cours d'une session d'été.

Règlement pédagogique particulier : pour s'inscrire au cours CHM1009 Stage en milieu de travail, l'étudiant doit avoir complété cinquante-sept crédits de son programme et avoir maintenu une moyenne cumulative d'au moins 2,5/4,3. Exceptionnellement, pour des raisons dûment justifiées et sous réserve de l'approbation du Comité de programme, une dérogation à ces conditions pourrait être accordée.

### **ENG6004 - L'hydrogène comme vecteur énergétique**

Objectifs : Se familiariser avec certains aspects de l'hydrogène comme vecteur énergétique. Prendre connaissance des divers modes de production, de distribution et de stockage de l'hydrogène. S'initier à divers aspects liés à la sécurité de l'hydrogène.

Contenu : Propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène. Introduction aux divers modes de production de l'hydrogène : reformage, extraction de la biomasse, électrolyse. Initiation aux principaux modes de stockage de l'hydrogène : compression, liquéfaction, stockage sur matériaux. Méthodes de distribution de l'hydrogène. Rôles de l'hydrogène. L'hydrogène et le système énergétique. Hydrogènes et batteries. Utilisation sécuritaire de l'hydrogène.

### **GEI1009 - Circuits électriques**

Acquérir les connaissances de base et les concepts relatifs à l'analyse de variables caractéristiques de diverses associations d'éléments de circuits électriques.

Concepts et conventions de circuits actifs, passifs et couplés. Éléments actifs : sources indépendantes et commandées. Éléments passifs : résistance, capacité, inductance. Topologie. Les lois de Kirchhoff. Théorème de Thévenin, théorème de Norton, principe de superposition, dualité. Application des quantités complexes. Méthode des mailles. Méthode des noeuds. Les fonctions d'excitation. Régimes transitoire et permanent. Réponse en régime transitoire de circuits du premier et deuxième ordre. Transformation de Laplace, résolution des équations différentielles linéaires par la transformation de Laplace, analyse transformationnelle des circuits.

### **MPU1015 - Algèbre**

Développer l'habileté à généraliser à travers l'étude des structures algébriques. Développer la capacité de démontrer et d'appliquer dans un contexte abstrait. Connaître les concepts et les méthodes de base de l'algèbre moderne. Comprendre les liens entre l'algèbre classique (du secondaire) et l'algèbre moderne.

Les structures de demi-groupe et de monoïde. La structure de groupe et les concepts connexes : sous-groupe, groupe cyclique, groupe-produit, groupe-quotient, homomorphisme de groupes et les théorèmes fondamentaux. La structure d'anneau et les concepts connexes : sous-anneau, anneau-produit, anneau-quotient, domaine d'intégrité, corps, anneau des polynômes sur un corps, corps des complexes.

### **NRG6000 - Science des matériaux**

Présenter une vue d'ensemble de la physique et la chimie des matériaux. Structure atomique. Défauts et diffusion. Solidification. Propriétés mécaniques. Diagrammes de phase. Transformation de phases et modification des propriétés mécaniques. Modification des propriétés de surface.

### **NRG9213 - Structure et propriétés des matériaux**

Présenter une vue d'ensemble des matériaux et particulièrement de l'influence des formes variées de structures sur leurs propriétés.

Types de liaisons. Structure cristalline. Défauts et diffusion. Élasticité, plasticité et ténacité. Phases et diagramme d'équilibre. Transformation de phases et modification des propriétés mécaniques. Théorie des bandes. Métaux, semi-conducteurs et isolants. Polymères. Céramiques. Matériaux composites. Elaboration des films minces. Modification des propriétés de surface. Visite d'installations de mise en forme des diverses classes de matériaux.

### **PHQ1012 - Relativité générale**

Se familiariser avec le formalisme et quelques applications de la relativité générale.

Transformation de Lorentz et équations de Maxwell en notation quadrivectorielle. Analyse tensorielle, dérivée covariante, courbure. Principe d'équivalence. Équation d'Einstein. Métrique de Schwarzschild. Approximation postnewtonienne et test de la relativité générale. Ondes gravitationnelles. Univers homogène et isotrope.

### **PHQ1013 - Optique**

Comprendre les notions de base de l'optique géométrique et de l'optique physique.

Formation d'images. La transformation colinéaire réduite pour un système à symétrie de révolution : dioptrique et miroir sphériques. Combinaison de systèmes : lentilles minces et épaisses, instruments. Diaphragmes et pupilles. Prismes et dispersion, aberrations. Optique ondulatoire. Représentation mathématique. Interférence. Diffraction proche et éloignée. Cohérence. Le réseau. Films minces et interféromètres. Polarisation, biréfringence et dispersion. Laser : principe de fonctionnement et applications.

### **PHQ1030 - Physique des particules élémentaires**

Se familiariser avec le formalisme des théories de jauge et le modèle standard des particules élémentaires.

Les particules et leur classification. Notation relativiste et formalisme lagrangien. Théories de jauge, mécanisme de Higgs. Sections efficaces. Accélérateurs et détecteurs. Particules W et Z, quarks. Diffusion inélastique profonde. Frontières de la théorie.

### **PMO1012 - Physique nucléaire**

Décrire la structure du noyau atomique et examiner la nature des réactions nucléaires.

Rappel de structure atomique. Structure des noyaux: isotopes, isotones, isobares; condition de stabilité, énergie de liaison. Rayonnement alpha et bêta, interaction avec la matière. Réactions nucléaires: équation en Q, section efficace. Modèles des noyaux.

### **PMO1016 - Projet de fin d'étude en physique (6 crédits)**

Ce cours de dernière année veut donner la possibilité à l'étudiant d'explorer par lui-même, sous la forme d'un projet de recherche restreint, un problème particulier en physique. L'étudiant devra faire preuve d'un certain degré d'initiative et d'autonomie. Après avoir choisi un professeur qui le supervise, l'étudiant définit un projet de recherche avec le professeur, puis effectue sous sa direction une étude bibliographique et/ou des travaux de recherche. Une synthèse de ces travaux est présentée par écrit et implique, de plus, une communication orale devant un groupe d'étudiants et de professeurs.

### **PMO6009 - Synthèse et caractérisation des matériaux (6 crédits)**

Approfondir les connaissances en matière de caractérisation et de synthèse de matériaux, particulièrement les nanomatériaux. Effet de la nanostructure sur les propriétés des matériaux. Concepts de phase cristalline, abondance de phases, grosseur de cristallites, orientation préférentielle. Méthodes de synthèse et de contrôle de la microstructure. Caractérisation des matériaux (cristallographique, chimique et morphologique). Préparation

d'échantillons et analyse de résultats.

### **PMO6014 - Introduction aux piles à combustibles et électrolyseurs (6 crédits)**

Ce cours porte sur l'étude des piles à combustible et des électrolyseurs. Après un survol des principes chimiques et physiques de base nécessaires au cours, Il s'intéressera à leurs principes de base, à leur fonctionnement et à leurs performances.

### **SCP1001 - Projet de fin d'études (6 crédits)**

Ce cours de dernière année veut donner la possibilité à l'étudiant d'explorer par lui-même, sous la forme d'un projet de recherche restreint, un problème particulier en chimie, en biochimie, et physique. L'étudiant devra faire preuve d'un certain degré d'initiative et d'autonomie. Après avoir choisi un projet de recherche parmi ceux proposés par le responsable du cours, l'étudiant consulte le professeur responsable du projet et, après entente, effectue sous sa direction une étude bibliographique et/ou expérimentale. Une synthèse de ces travaux est présentée par écrit et implique, de plus, une communication orale devant un groupe d'étudiants et de professeurs.

Règlement pédagogique particulier : pour s'inscrire au cours SCP1001 Projet de fin d'études, l'étudiant doit avoir complété cinquante-sept crédits de son programme et avoir maintenu une moyenne cumulative d'au moins 2,5/4,3. Exceptionnellement, pour des raisons dûment justifiées et sous réserve de l'approbation du Comité de programme, une dérogation à ces conditions pourrait être accordée.

### **SFC1001 - Sciences forensiques et criminalistique (6 crédits)**

Cours d'introduction à la science forensique ou traçologie. Comprendre l'ontologie de la trace physique, chimique, biologique et numérique. Connaître les principes, l'histoire, les concepts, la méthodologie propres à cette discipline de la scène d'investigation à son exploitation en cour de justice, dans l'enquête et dans l'élaboration du renseignement. Maîtriser sa sémantique. A partir de différentes traces à la disposition du praticien, reconnaître les inférences mises en œuvre, les différents niveaux d'interprétation et leur formalisation.

État des lieux de la forensique au XXIe siècle, éthique, définition du corpus et épistémologie forensique ; l'ontologie de la trace ; la Déclaration de Sydney ; la cueillette des traces à leur exploitation : la méthode scientifique. Introduction à l'interprétation : hiérarchie des propositions, biais cognitifs, probabilité épistémique et approche prescriptive. Le spectre de traces : biologiques et d'impression humaine, les traces de transfert, d'objets, d'armes, les microtraces, les traces chimiques, les traces numériques, thanatologiques.

### **SFC1005 - Probabilité appliquée à la criminalistique (6 crédits)**

Initier l'étudiant aux principales méthodes statistiques et aux principaux modèles de probabilité utilisés en criminalistique.

Probabilités : axiomes de Kolmogorov, probabilités conditionnelles, indépendance d'événements, applications à la génétique des populations et aux preuves d'ADN. Théorème de Bayes : probabilités a priori et a posteriori. Statistique descriptive. Variables aléatoires discrètes et continues. Échantillonnage et intervalles de confiance. Test d'hypothèses. Analyse de la variance. Régression et corrélation linéaire. Modèles d'interprétation de différents types d'indice en justice. Argumentation probabiliste, erreurs d'interprétation et fallacies.

### **SFC1008 - Incendies et explosions (6 crédits)**

Comprendre et reconstruire la dynamique d'un incendie et d'une explosion. Identifier le point origine et procéder à la collecte des traces pertinentes. Assurer le traitement analytique et l'interprétation des accélérateurs et des explosifs utilisés. Inférer l'engin incendiaire ou explosif.

Thermodynamique, physique, électricité, chimie des incendies et explosions. Types d'explosifs. Collecte des traces lors d'incendies et d'explosions. Processus d'assurance-qualité en analyse d'incendies et explosions. Laboratoires : tests présomptifs; prélèvements sur scène d'incendie et d'explosion; analyse et identification d'accélérateurs; analyse et identification d'explosifs; reconstruction de l'engin.

### **SFC1043 - Simulation : balistique et collision (6 crédits)**

Introduction à la simulation numérique en mécanique classique. Représentation d'une scène par des formes géométriques simples et convexes. Contraintes et collisions. Discrétisation du temps et évolution temporelle d'une trajectoire balistique. Introduction à une librairie physique libre de droit avec python. Calibration à partir de modèles simples. Reconstruction de scénarios d'accident à partir d'une scène finale. Discrimination d'hypothèses.



## Cours optionnels (21 crédits)

L'étudiant suit de zéro à six crédits (0 à 6 crédits) de cours optionnels parmi la liste suivante :

L'étudiant suit quinze à vingt et un crédits (15 à 21 crédits) de cours optionnels parmi la liste suivante :

### IAR1001 - Intelligence artificielle (6 crédits)

L'objectif principal de ce cours est d'apprendre les concepts de base de l'intelligence artificielle (IA) et, en particulier, ses aspects informatiques et mathématiques. L'étudiant devra être en mesure d'identifier les problèmes qui relèvent de l'IA, de sélectionner les techniques ou approches pertinentes et de les mettre en application de façon efficace. Les techniques de représentation des connaissances (structures de données) et de recherche (algorithmes), ainsi que leur réalisation informatique, de même que certains domaines d'application, constituent la matière fondamentale de ce cours. Plus spécifiquement, la matière sera présentée principalement dans la perspective des agents intelligents, et, de façon complémentaire, dans le contexte des systèmes multiagents et de l'intelligence artificielle distribuée.

Le cours fait le tour des aspects d'actualité de l'intelligence artificielle. Les agents "intelligents" servent de vecteur pour promouvoir l'explication des autres concepts de l'IA. Parmi ces concepts, nous voyons : les méthodes et stratégies de recherches de solution, les méthodes de jeux, la connaissance et le raisonnement fondés sur la logique du premier ordre et les inférences en logique du premier ordre, la planification et l'action logique et, enfin, le raisonnement probabiliste avec des connaissances incertaines. Dans une deuxième partie, nous introduisons la notion d'apprentissage automatique au moyen des réseaux de neurones et le traitement des langues naturelles.

### INF1004 - Structures de données et algorithmes (6 crédits)

Permettre à l'étudiant de se familiariser avec les structures de données classiques et les algorithmes qui leur sont associés; réaliser des implantations statiques et dynamiques de ces structures : faire l'évaluation de la complexité spatiale et temporelle dans les cas simples; étudier la récursion et la comparer avec l'itération.

Revue des concepts élémentaires de programmation; bases de la programmation Objet: encapsulation, dissimulation de l'information; séparation du comportement et de l'implantation; héritage et polymorphisme; conception par héritage et par composition; utilisation de fichiers; les principales structures de données: liste, pile, file, table d'adressage dispersé, arbre, graphe; implantation statique et dynamique; les algorithmes de fouille, de tri, les fonctions de hachage et les stratégies de traitement des collisions, parcours d'arbres et de graphes; le concept de récursion : les fonctions mathématiques récursives; comparaison avec les fonctions itératives correspondantes; implantation de récursion à l'aide de piles; analyse élémentaire de la complexité des algorithmes: complexité spatiale et complexité temporelle; notation "grand O", comportement du meilleur cas, du cas moyen et du pire cas; principales classes de complexité d'algorithmes; stratégies de test pour les classes et les applications.

Ce cours utilise le langage de programmation Java et la plateforme Eclipse.

### PHQ6003 - Physique statistique avancée (6 crédits)

Approfondir la compréhension de la physique statistique et l'utiliser dans des applications modernes. Les sujets traités seront choisis parmi les suivants : fondements de la physique statistique : ensembles et fluctuations. Transitions de phase : transitions du premier et du deuxième ordre, approche du champ moyen, notion d'universalité et groupe de renormalisation. Modèles de Ising et de Potts. Physique statistique hors d'équilibre. Théorie cinétique des gaz. Hiérarchie BBGKY. Équation de Boltzmann. Diffusion. Propriétés de transport. Méthode de théorie des champs en physique statistique.

### PMO1014 - Mécanique des fluides (6 crédits)

Résoudre des problèmes de mécanique des fluides au moyen de différentes techniques : équations aux dérivées partielles, méthodes numériques, analyse dimensionnelle.

Obtention des équations de conservation (formes différentielle et intégrale), approches lagrangienne et eulérienne. Fluide idéal. Équations d'Euler et de Bernoulli, écoulements potentiel et incompressible, ondes. Fluides visqueux, fluides newtoniens et équation de Navier-Stokes, écoulements laminaires et turbulence. Différences finies et volumes finis, utilisation de logiciels courants.

### PMO6002 - Mécanique quantique avancée (6 crédits)

Approfondir la compréhension du formalisme de la mécanique quantique et l'utiliser dans des applications modernes. Les sujets traités seront typiquement choisis parmi les suivants: équation de Dirac, intégrale fonctionnelle, seconde quantification, symétrie des atomes, des molécules et des cristaux; méthode de Hartree-Fock et fonctionnelle de densité, optique quantique, informatique quantique et décohérence.

### **PMO6011 - Méthodes de simulation numérique en sciences des matériaux (6 crédits)**

Initier les étudiant(es) à l'utilisation de méthodes de simulations avancées dans le cadre de la science des matériaux. Probabilités et statistiques, Physique statistique. Analyse d'erreur. Méthodes numériques de base. Simulations Monte Carlo. Simulations de dynamique moléculaire. Corrections quantiques. Monte Carlo quantique. Simulations de chimie quantique. DFT quantique et dynamique moléculaire quantique.

### **PRO1027 - Programmation scientifique en C (6 crédits)**

Approfondir les concepts fondamentaux de la conception et de la production de logiciel. Développer l'habileté à réaliser des logiciels de qualité. Réaliser des applications pratiques dans le domaine des méthodes numériques.

Étude des langages C et C++. Qualité des programmes : clarté, lisibilité, modifiabilité, efficacité, facilité d'usage, robustesse. Programmation modulaire. Programmation en langage C ou C++. A titre indicatif, les applications sont choisies parmi les suivantes : statistiques, manipulation de matrices, résolution de systèmes d'équations linéaires, interpolation, approximation, dérivation et intégration numériques.

L'étudiant suit de zéro à six crédits (0 à 6 crédits) de cours optionnels parmi la liste suivante :

### **ALG1001 - Logiques et Ensembles (6 crédits)**

S'initier aux concepts de base des mathématiques actuelles à travers l'étude de concepts de la logique et de la théorie des ensembles. Développer la capacité de faire des preuves.

Logique propositionnelle : formes propositionnelles et connecteurs logiques, dérivations et méthodes de preuves. Logique des prédicats : quantificateurs et raisonnements avec ceux-ci. Concepts ensemblistes : approche intuitive et approche axiomatique des ensembles, axiome des naturels et preuve par induction mathématique. Relations, relations d'ordre, relations d'équivalence. Fonctions et applications.

### **ASP1002 - Astrophysique (6 crédits)**

Approfondir l'étude de la structure et des conditions de stabilité et d'évolution des étoiles. Faire le lien entre ce que les outils d'observation peuvent mesurer et ce dont les modèles mathématiques, basés sur la physique contemporaine, ont besoin pour pouvoir décrire adéquatement les phénomènes.

Survol des connaissances et des problèmes principaux de l'astrophysique contemporaine. Les étoiles et leur rayonnement: description et classification, valeur des paramètres physiques (masse, rayon, densité, classe spectrale, etc.). Structure et évolution des étoiles: atmosphères et intérieurs, sources d'énergie, équilibres hydrodynamique et thermodynamique; équations pertinentes. Étoiles variables: genre d'instabilités, conditions temporaires. Autres sources irrégulières: quasars, sources X, etc. Structure de l'univers: théories, paramètres mesurables, genre de matière et particules fondamentales, modèles d'évolution; situation actuelle des connaissances.

### **CHM1009 - Stage en milieu de travail (6 crédits)**

Acquérir une expérience professionnelle reliée à sa formation en effectuant un stage de travail de nature professionnelle en milieu industriel ou dans un lieu de recherche universitaire ou autre. Avec l'aide du responsable de stage, l'étudiant se trouve un lieu de stage pertinent à sa formation dans les domaines soit de la chimie, de la biochimie, des biotechnologies ou de la physique. Le stage se déroule sous la supervision académique du professeur responsable du cours et, en milieu de travail, sous celle d'un tuteur désigné.

Le stage est préférablement réalisé à plein temps au cours d'une session d'été.

Règlement pédagogique particulier : pour s'inscrire au cours CHM1009 Stage en milieu de travail, l'étudiant doit avoir complété cinquante-sept crédits de son programme et avoir maintenu une moyenne cumulative d'au moins 2,5/4,3. Exceptionnellement, pour des raisons dûment justifiées et sous réserve de l'approbation du Comité de programme, une dérogation à ces conditions pourrait être accordée.

### **ENG6004 - L'hydrogène comme vecteur énergétique (6 crédits)**

Objectifs : Se familiariser avec certains aspects de l'hydrogène comme vecteur énergétique. Prendre connaissance des divers modes de production, de distribution et de stockage de l'hydrogène. S'initier à divers aspects liés à la sécurité de l'hydrogène.

Contenu : Propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène. Introduction aux divers modes de production de l'hydrogène : reformage, extraction de la biomasse, électrolyse. Initiation aux principaux modes de stockage de l'hydrogène : compression, liquéfaction, stockage sur matériaux. Méthodes de distribution de l'hydrogène. Rôles de l'hydrogène. L'hydrogène et le système énergétique. Hydrogènes et batteries. Utilisation sécuritaire de l'hydrogène.

### **GEI1009 - Circuits électriques (6 crédits)**

Acquérir les connaissances de base et les concepts relatifs à l'analyse de variables caractéristiques de diverses associations d'éléments de circuits électriques.

Concepts et conventions de circuits actifs, passifs et couplés. Éléments actifs : sources indépendantes et commandées. Éléments passifs : résistance, capacité, inductance. Topologie. Les lois de Kirchhoff. Théorème de Thévenin, théorème de Norton, principe de superposition, dualité. Application des quantités complexes. Méthode des mailles. Méthode des noeuds. Les fonctions d'excitation. Régimes transitoire et permanent. Réponse en régime transitoire de circuits du premier et deuxième ordre. Transformation de Laplace, résolution des équations différentielles linéaires par la transformation de Laplace, analyse transformationnelle des circuits.

### **MPU1015 - Algèbre (6 crédits)**

Développer l'habileté à généraliser à travers l'étude des structures algébriques. Développer la capacité de démontrer et d'appliquer dans un contexte abstrait. Connaître les concepts et les méthodes de base de l'algèbre moderne. Comprendre les liens entre l'algèbre classique (du secondaire) et l'algèbre moderne.

Les structures de demi-groupe et de monoïde. La structure de groupe et les concepts connexes : sous-groupe, groupe cyclique, groupe-produit, groupe-quotient, homomorphisme de groupes et les théorèmes fondamentaux. La structure d'anneau et les concepts connexes : sous-anneau, anneau-produit, anneau-quotient, domaine d'intégrité, corps, anneau des polynômes sur un corps, corps des complexes.

### **NRG6000 - Science des matériaux (6 crédits)**

Présenter une vue d'ensemble de la physique et la chimie des matériaux. Structure atomique. Défauts et diffusion. Solidification. Propriétés mécaniques. Diagrammes de phase. Transformation de phases et modification des propriétés mécaniques. Modification des propriétés de surface.

### **NRG9213 - Structure et propriétés des matériaux (6 crédits)**

Présenter une vue d'ensemble des matériaux et particulièrement de l'influence des formes variées de structures sur leurs propriétés.

Types de liaisons. Structure cristalline. Défauts et diffusion. Élasticité, plasticité et ténacité. Phases et diagramme d'équilibre. Transformation de phases et modification des propriétés mécaniques. Théorie des bandes. Métaux, semi-conducteurs et isolants. Polymères. Céramiques. Matériaux composites. Elaboration des films minces. Modification des propriétés de surface. Visite d'installations de mise en forme des diverses classes de matériaux.

### **PHQ1012 - Relativité générale (6 crédits)**

Se familiariser avec le formalisme et quelques applications de la relativité générale.

Transformation de Lorentz et équations de Maxwell en notation quadri-vectorielle. Analyse tensorielle, dérivée covariante, courbure. Principe d'équivalence. Équation d'Einstein. Métrique de Schwarzschild. Approximation postnewtonienne et test de la relativité générale. Ondes gravitationnelles. Univers homogène et isotrope.

### **PHQ1013 - Optique (6 crédits)**

Comprendre les notions de base de l'optique géométrique et de l'optique physique.

Formation d'images. La transformation colinéaire réduite pour un système à symétrie de révolution : dioptre et miroir sphériques. Combinaison de systèmes : lentilles minces et épaisses, instruments. Diaphragmes et pupilles. Prismes et dispersion, aberrations. Optique ondulatoire. Représentation mathématique. Interférence. Diffraction proche et éloignée. Cohérence. Le réseau. Films minces et interféromètres. Polarisation, biréfringence et dispersion. Laser : principe de fonctionnement et applications.

### **PHQ1030 - Physique des particules élémentaires (6 crédits)**

Se familiariser avec le formalisme des théories de jauge et le modèle standard des particules élémentaires.

Les particules et leur classification. Notation relativiste et formalisme lagrangien. Théories de jauge, mécanisme de Higgs. Sections efficaces. Accélérateurs et détecteurs. Particules W et Z, quarks. Diffusion inélastique profonde. Frontières de la théorie.

### **PMO1012 - Physique nucléaire (6 crédits)**

Décrire la structure du noyau atomique et examiner la nature des réactions nucléaires.

Rappel de structure atomique. Structure des noyaux: isotopes, isotones, isobares; condition de stabilité, énergie de liaison. Rayonnement alpha et bêta, interaction avec la matière. Réactions nucléaires: équation en Q, section efficace. Modèles des noyaux.

### **PMO1016 - Projet de fin d'étude en physique (6 crédits)**

Ce cours de dernière année veut donner la possibilité à l'étudiant d'explorer par lui-même, sous la forme d'un projet de recherche restreint, un problème particulier en physique. L'étudiant devra faire preuve d'un certain degré d'initiative et d'autonomie. Après avoir choisi un professeur qui le supervise, l'étudiant définit un projet de recherche avec le professeur, puis effectue sous sa direction une étude bibliographique et/ou des travaux de recherche. Une synthèse de ces travaux est présentée par écrit et implique, de plus, une communication orale devant un groupe d'étudiants et de professeurs.

### **PMO6009 - Synthèse et caractérisation des matériaux (6 crédits)**

Approfondir les connaissances en matière de caractérisation et de synthèse de matériaux, particulièrement les nanomatériaux. Effet de la nanostructure sur les propriétés des matériaux. Concepts de phase cristalline, abondance de phases, grosseur de cristallites, orientation préférentielle. Méthodes de synthèse et de contrôle de la microstructure. Caractérisation des matériaux (cristallographique, chimique et morphologique). Préparation d'échantillons et analyse de résultats.

### **PMO6014 - Introduction aux piles à combustibles et électrolyseurs (6 crédits)**

Ce cours porte sur l'étude des piles à combustible et des électrolyseurs. Après un survol des principes chimiques et physiques de base nécessaires au cours, il s'intéressera à leurs principes de base, à leur fonctionnement et à leurs performances.

### **SCP1001 - Projet de fin d'études (6 crédits)**

Ce cours de dernière année veut donner la possibilité à l'étudiant d'explorer par lui-même, sous la forme d'un projet de recherche restreint, un problème particulier en chimie, en biochimie, et physique. L'étudiant devra faire preuve d'un certain degré d'initiative et d'autonomie. Après avoir choisi un projet de recherche parmi ceux proposés par le responsable du cours, l'étudiant consulte le professeur responsable du projet et, après entente, effectue sous sa direction une étude bibliographique et/ou expérimentale. Une synthèse de ces travaux est présentée par écrit et implique, de plus, une communication orale devant un groupe d'étudiants et de professeurs.

Règlement pédagogique particulier : pour s'inscrire au cours SCP1001 Projet de fin d'études, l'étudiant doit avoir complété cinquante-sept crédits de son programme et avoir maintenu une moyenne cumulative d'au moins 2,5/4,3. Exceptionnellement, pour des raisons dûment justifiées et sous réserve de l'approbation du Comité de programme, une dérogation à ces conditions pourrait être accordée.

### **SFC1001 - Sciences forensiques et criminalistique (6 crédits)**

Cours d'introduction à la science forensique ou traçologie. Comprendre l'ontologie de la trace physique, chimique, biologique et numérique. Connaître les principes, l'histoire, les concepts, la méthodologie propres à cette discipline de la scène d'investigation à son exploitation en cour de justice,

dans l'enquête et dans l'élaboration du renseignement. Maîtriser sa sémantique. A partir de différentes traces à la disposition du praticien, reconnaître les inférences mises en œuvre, les différents niveaux d'interprétation et leur formalisation.

État des lieux de la forensique au XXI<sup>e</sup> siècle, éthique, définition du corpus et épistémologie forensique ; l'ontologie de la trace ; la Déclaration de Sydney ; la cueillette des traces à leur exploitation : la méthode scientifique. Introduction à l'interprétation : hiérarchie des propositions, biais cognitifs, probabilité épistémique et approche prescriptive. Le spectre de traces : biologiques et d'impression humaine, les traces de transfert, d'objets, d'armes, les microtraces, les traces chimiques, les traces numériques, thanatologiques.

### **SFC1005 - Probabilité appliquée à la criminalistique (6 crédits)**

Initier l'étudiant aux principales méthodes statistiques et aux principaux modèles de probabilité utilisés en criminalistique.

Probabilités : axiomes de Kolmogorov, probabilités conditionnelles, indépendance d'événements, applications à la génétique des populations et aux preuves d'ADN. Théorème de Bayes : probabilités a priori et a posteriori. Statistique descriptive. Variables aléatoires discrètes et continues. Échantillonnage et intervalles de confiance. Test d'hypothèses. Analyse de la variance. Régression et corrélation linéaire. Modèles d'interprétation de différents types d'indice en justice. Argumentation probabiliste, erreurs d'interprétation et fallacies.

### **SFC1008 - Incendies et explosions (6 crédits)**

Comprendre et reconstruire la dynamique d'un incendie et d'une explosion. Identifier le point origine et procéder à la collecte des traces pertinentes. Assurer le traitement analytique et l'interprétation des accélérateurs et des explosifs utilisés. Inférer l'engin incendiaire ou explosif.

Thermodynamique, physique, électricité, chimie des incendies et explosions. Types d'explosifs. Collecte des traces lors d'incendies et d'explosions. Processus d'assurance-qualité en analyse d'incendies et explosions. Laboratoires : tests présomptifs; prélèvements sur scène d'incendie et d'explosion; analyse et identification d'accélérateurs; analyse et identification d'explosifs; reconstruction de l'engin.

### **SFC1043 - Simulation : balistique et collision (6 crédits)**

Introduction à la simulation numérique en mécanique classique. Représentation d'une scène par des formes géométriques simples et convexes. Contraintes et collisions. Discrétisation du temps et évolution temporelle d'une trajectoire balistique. Introduction à une librairie physique libre de droit avec python. Calibration à partir de modèles simples. Reconstruction de scénarios d'accident à partir d'une scène finale. Discrimination d'hypothèses.

### **Cours complémentaires (9 crédits)**

L'étudiant choisit neuf crédits de cours complémentaires figurant sur sa fiche d'inscription, ou d'autres cours, avec l'approbation de son responsable de programme. Certains cours sont offerts en ligne.